



# VU Research Portal

## Trajecten voor verduurzaming van de Nederlandse energievoorziening met een accent op de bijdrage van waterstof - Rapportage uit de H2 Dialoog

Hisschemoller, M.; Bode, M.G.A.; van de Kerkhof, M.F.; Stam, T.

2007

### **document version**

Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link to publication in VU Research Portal](#)

### **citation for published version (APA)**

Hisschemoller, M., Bode, M. G. A., van de Kerkhof, M. F., & Stam, T. (2007). *Trajecten voor verduurzaming van de Nederlandse energievoorziening met een accent op de bijdrage van waterstof - Rapportage uit de H2 Dialoog*. (IVM Report; No. R-07/06). Instituut voor Milieuvraagstukken, Vrije Universiteit.

### **General rights**

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal ?

### **Take down policy**

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

### **E-mail address:**

[vuresearchportal.ub@vu.nl](mailto:vuresearchportal.ub@vu.nl)

# **Trajecten voor verduurzaming van de Nederlandse energievoorziening**

**met een accent op de bijdrage van waterstof**

**Rapportage uit de H<sub>2</sub> Dialoog**

Matthijs Hisschemöller, Ries Bode, Marleen van de Kerkhof en Tjeerd Stam

Met bijlagen van Noor van Andel, Jaap Hurman, Hendrik de Wit, Kas Hemmes, Henk Barten en Boudewijn Klaversteijn



R-07/06

December 2007

De H<sub>2</sub> Dialoog is financieel mogelijk gemaakt door een subsidie van het NWO/ACTS programma Duurzame Waterstof ([www.nwo.nl/acts](http://www.nwo.nl/acts)). Daarnaast is bijgedragen vanuit het programma BSIK Klimaat voor Ruimte, SenterNovem en de Raad voor Ruimtelijk, Milieu en Natuur Onderzoek.

De verantwoordelijkheid voor deze publicatie berust bij de auteurs. Wij danken alle dialoogdeelnemers en de leden van het externe panel voor hun bijdrage aan de discussie. In het bijzonder danken wij de volgende betrokkenen voor hun schriftelijke reactie op eerdere versies van dit rapport: Hans van den Akker, Noor van Andel, Henk Barten, Frank de Bruijn, Joris den Blanken, Jos Bruggink, Jaap Jelle Feenstra, Wilco Fichter, Bert van Haastrecht, Alexander Hablé, Kas Hemmes, Jaap Huurman, Christiaan Hogerhuis, Remco Hoogma, Howard Levinsky, Marco Kolkman, Ronald Mallant, Eric Middelman, Fiona Montijn, Ton Schoot Uiterkamp, Marcel Weeda, Hendrik de Wit.

Twee organisaties hebben ons te kennen gegeven het rapport en de aanbevelingen niet te kunnen onderschrijven. Het ECN heeft laten weten met name niet te kunnen instemmen met de conclusies ten aanzien van waterstof uit decentraal opgewekte duurzame elektriciteit in de gebouwde omgeving en de conclusies ten aanzien van onderzoek naar een geïntegreerde energie infrastructuur die ruimte biedt aan zowel methaan als waterstof. Het ECN heeft voorts bezwaar gemaakt tegen het dialoogproces, omdat hierin geen dan wel te weinig onderscheid is gemaakt tussen de inbreng van stakeholders met een mening over waterstof en de inbreng van echte waterstof experts. Greenpeace heeft laten weten niet in te stemmen met het rapport, omdat Greenpeace hierin een pleidooi leest voor waterstof uit kolencentrales.

## IVM

Instituut voor Milieuvraagstukken  
Vrije Universiteit  
De Boelelaan 1087  
1081 HV Amsterdam

Tel. 020-5989 555  
Fax. 020-5989 553  
E-mail: [info@ivm.falw.vu.nl](mailto:info@ivm.falw.vu.nl)

**ISBN 978-90-5192-039-0**

**Copyright © 2007, Instituut voor Milieuvraagstukken**

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de houder van het auteursrecht.

## Inhoud

Deelnemers aan de H <sub>2</sub> Dialoog	iii
Conclusies en aanbevelingen voor beleid en maatschappij	v
1. Inleiding	1
2. Politiek maatschappelijke context	3
3. Werkwijze H <sub>2</sub> Dialoog	5
4. Bevindingen uit de H <sub>2</sub> Dialoog	7
4.1 Bevindingen decentraal duurzaam	7
4.2 Bevindingen voor de wegtransportsector	12
4.3 Bevindingen Waterstof in de bestaande energie infrastructuur	16
5. Integrale visie	25
Literatuur	31
Bijlage 1. Resultaten rekenmodel voor CO <sub>2</sub> -reductie	33
Bijlage 2. Het Zonneterp concept	43
Bijlage 3. Het concept De Stoere Houtman	47
Bijlage 4. Blending Hydrogen to Natural Gas <sup>1</sup>	51
Bijlage 5. Het concept Gass River	63



## Deelnemers aan de H<sub>2</sub> Dialoog

### Deelnemers Groep 1

De heer J.L. van den Akker (vz)  
De heer H. Barten  
De heer L. van de Beld  
De heer G. van den Berg  
De heer F. Berkhout  
De heer R. Bode (secretaris)  
De heer D. Boot  
De heer A.F. Correljé  
De heer F. Denys  
De heer B. van Haastrecht  
De heer K. Hemmes  
De heer C. Hogenhuis  
De heer R. van Hutten  
Mevrouw A.M.J. Janssen  
De heer L.H. Knoester  
De heer G. van der Lee  
De heer B. Lefebvre  
De heer H.B. Levinsky  
De heer W.C. Mallon  
De heer H.J.M.B. Pauwels  
De heer H. Vrijenhoef  
De heer H. de Wit

### Deelnemers Groep 2

De heer J.J. Feenstra (vz)  
De heer H. van Bergen  
De heer J. den Blanken  
De heer J. Bruggink  
De heer J. van Delft  
De heer H. Dubbelman  
De heer G.W. Fiechter  
De heer M. van Groeningen  
De heer A. Hablé  
De heer J. Helfrich  
De heer N. Hooghof  
De heer R. Hoogma  
De heer J. Bakker  
De heer R.K.A.M. Mallant  
De heer P. Meyboom  
De heer E. Middelman  
Mevrouw F.N.H. Montijn  
De heer F.W.J. Mulder  
De heer T. Stam (secretaris)  
De heer L. Vinckx

### H<sub>2</sub> via de bestaande infrastructuur

Oud-CDA Tweede Kamerlid  
Ecofys  
BTG  
Vaillant  
VU-IVM  
VU-IVM  
Vereniging Nederlandse Petroleum Industrie  
TU Delft  
SenterNovem  
Corus  
TU Delft  
Stichting Oikos  
Cogas Energie  
Port of Rotterdam  
Ministerie van Economische Zaken  
TenneT BV  
Ballast Nedam  
Gasunie Engineering and Technology  
Energy Delta Instituut  
NEN  
Micro Chemie BV  
Linde Gas Benelux

### H<sub>2</sub> in de wegtransportsector

Port of Rotterdam  
Gemeente Amsterdam, Dienst Milieu en Bouwtoezicht  
Greenpeace  
ECN  
Terberg Leasing BV  
Daimler Chrysler  
NS Reizigers  
Nuon  
Ministerie van Verkeer en Waterstaat  
Connexxion  
ANWB  
SenterNovem  
Connexxion  
ECN  
Air Products Nederland BV  
NedStack BV  
TU Eindhoven  
SenterNovem  
VU-IVM  
General Motors

**Deelnemers Groep 3**

De heer E. van Middelkoop  
(vz tot februari 2006)  
De heer N. van Andel  
Mevrouw M. Baretta  
De heer G. Calis  
De heer I. van der Deen  
De heer D. van der Hoeven  
De heer J.K. Hordijk  
De heer J. Huurman  
Mevrouw E. Keijser  
De heer R. Knol  
De heer M. Kolkman  
De heer E. de Nie  
De heer P. de Rijk  
De heer J. Schoonman  
De heer A.J.M. Schoot Uiterkamp  
De heer J. Smolenaars  
De heer T. Stam (secretaris)  
Mevrouw A. Stevens  
  
De heer H. Vandenborre  
De heer J. Verlinden  
De heer E. de Wit  
De heer N. de Witte

**Extern panel**

De heer Peter Aubert  
De heer Leo Blomen  
De heer Teun Bokhoven  
De heer Gerard Dijkema  
De heer Onno Florisson  
De heer Hans Hof  
Mevrouw Marjan Hofkes  
De heer Paulus Jansen  
Mevrouw Renée Janssen  
De heer Boudewijn Klaversteijn  
De heer Kees van der Klein  
De heer Joop Oude Lohuis  
De heer Paul Metz  
De heer Bas van Ruijven  
De heer Sible Schöne  
De heer Bert de Wit

**Decentraal en duurzaam geproduceerde H<sub>2</sub> in de gebouwde omgeving**

(voorheen) Eerste Kamerlid Christen Unie,  
tegenwoordig Minister van Defensie  
Fiwihex  
Greenpeace Netherlands  
DSM Solutech  
Gemeente Arnhem  
Daedalus  
Essent Energie BV  
De Stoere Houtman  
SenterNovem  
Siemens Nederland NV  
SenterNovem  
Nederlandse Waterstof Vereniging  
WISE-Amsterdam  
TU Delft, Afd. Anorganische Chemie  
RUG  
HyGear BV  
VU-IVM  
(voorheen) Duurzame Energie Koepel,  
tegenwoordig Stichting Natuur en Milieu  
VandenBorre Hydrogen Systems NV  
Ministerie van VROM, directoraat-generaal wonen  
Plug Power Holland BV  
Nebib

Ministerie van Economische Zaken  
Hydrogen Corporation  
DE Koepel  
TU Delft  
Gasunie  
Europe's Energy Point  
VU-IVM  
Tweede Kamerlid SP  
Energy Plus  
Winways Innovation  
ECN  
MNP  
Integer Consult  
MNP  
Klimaatbureau  
RMNO

## Conclusies en aanbevelingen voor beleid en maatschappij

### De H<sub>2</sub> Dialoog

In de H<sub>2</sub> Dialoog hebben zo'n vijftig betrokkenen uit het bedrijfsleven, kennisinstituten en overheid op persoonlijke titel de mogelijkheden verkend voor een verduurzaming van de energievoorziening en met name de rol die waterstof hierbij kan spelen. Deze verkenning is uitgevoerd door drie dialooggroepen, geleid door onafhankelijke voorzitters met een staat van dienst in beleid en bestuur:

1. Waterstof in de bestaande infrastructuur (voorzitter Hans van den Akker);<sup>1</sup>
2. Waterstof in de transportsector (voorzitter Jaap Jelle Feenstra);<sup>2</sup>
3. Decentraal duurzaam in de gebouwde omgeving (voorzitter Eimert van Middelkoop).<sup>3</sup>

Een bijzonder kenmerk van de dialoog is dat er geen eensgezindheid is nagestreefd maar dat juist gezocht is naar het verkennen van mogelijk concurrerende routes. En er is zoveel mogelijk gekeken naar alternatieven met en zonder waterstof. Dit betekent dat de conclusies en aanbevelingen in dit rapport niet door alle partijen in gelijke mate worden onderschreven.

De dialooggroepen hebben routes gedefinieerd en hierbij kansen en barrières bediscussieerd. Voor elke route is het projectteam nagegaan wat het reductiepotentieel is in CO<sub>2</sub> eq. na 15 jaar, dus in 2022.<sup>4</sup> Dat jaar is een momentopname. Met name niet-waterstof routes kunnen tegen die tijd een behoorlijk marktaandeel hebben verworven. Eenmaal verankerd in de markt zal het aandeel van duurzame opties ook zonder aanvullend klimaatbeleid kunnen doorgroeien. Voor de waterstofroutes geldt dat wanneer nu een start wordt gemaakt hun aandeel na 2020 fors zal groeien. Er zullen ook meer mogelijkheden komen om waterstof duurzaam te produceren. Ten aanzien van waterstof concludeert de dialoog dat er aanvankelijk vooral zeer goede kansen liggen in de transportsector. Daarnaast liggen er goede kansen in de stationaire sector. Hier zal waterstof met name bijdragen aan de vergroening van gas en de opslag van overtollige elektriciteit.

Hoewel in de dialoog veel over technologieën is gesproken, ligt het belangrijkste resultaat misschien wel op het vlak van de conceptuele vernieuwing. Uit de Dialoog komt

---

<sup>1</sup> Voormalig voorzitter metaalwerkgeversorganisatie FME, voormalig lid Tweede Kamer CDA.

<sup>2</sup> Voormalig lid Tweede Kamer PvdA, thans hoofd Public Affairs Port of Rotterdam.

<sup>3</sup> Voormalig lid Tweede Kamer Christen-Unie, voormalig lid Eerste Kamer. In februari 2007 heeft Van Middelkoop het voorzitterschap neergelegd in verband met zijn benoeming tot Minister van Defensie in het nieuwe kabinet Balkenende.

<sup>4</sup> Aangezien onze bevindingen wellicht verrassend zijn, is een peer-review er van aan te bevelen. In Bijlage 1 zijn alle kentallen weergegeven, waarop onze berekeningen zijn gebaseerd. Ten aanzien van de kosten beperken wij ons tot het rapporteren van de claim van betrokkenen bij de concepten voor de gebouwde omgeving dat deze zullen leiden tot een woonlastenverlaging met 10 – 25% ten opzichte van het huidige niveau.



naar voren dat er technisch enorm veel mogelijk is maar dat beleid, politiek, markt- en kennisnetwerken de mogelijkheden tot systeemverandering vaak niet zien of geloven. Dit komt doordat de heersende manier van denken bepaalde mogelijkheden vaak op voorhand uitsluit.

De resultaten van de dialoog laten zich typeren als routes voor systeemverandering die kunnen leiden tot laag- en nul-emissie gebouwen, voertuigen en industrieparken. De routes en opties die in de H<sub>2</sub> Dialoog aan de orde zijn geweest kunnen leiden tot circa 15% reductie van CO<sub>2</sub> eq. (circa 60 Mton) in 2022 ten opzichte van het niveau van 1990. Hierbij is het beleidstekort dat mogelijk ontstaat door de toename van emissies als gevolg van economische groei niet meegerekend. Hoewel tal van opties in de dialoog buiten beschouwing zijn gebleven, bevestigen de bevindingen dat de reductiedoelstellingen van de Nederlandse regering en van de EU voor 2020 zeer ambitieus zijn. Alle zeilen moeten worden bijgezet.

Er wordt ook geconcludeerd dat de routes, afzonderlijk of gezamenlijk, een bijdrage leveren aan stedelijke luchtkwaliteit, voorzieningszekerheid, met name het verminderen van de afhankelijkheid van olie en gas uit instabiele regio's, en leveringszekerheid, waaronder ook begrepen wordt de afname van de kwetsbaarheid van de energie infrastructuur bij extreme weersomstandigheden. Tenslotte zijn de aanbevelingen er op gericht om steeds de keuzevrijheid van afnemers van energie te garanderen en concurrentie qua aanbod te bevorderen. Waar mogelijk is in het rapport ook aangegeven welke routes van belang kunnen zijn voor ontwikkelingslanden.

Hieronder volgen 20 aanbevelingen die op basis van de discussies in de H<sub>2</sub> Dialoog zijn geformuleerd en die handvatten leveren voor een acceleratie van de verduurzaming van het energiesysteem.

### Aanbevelingen voor integrale beleidsontwikkeling

Maatschappelijke partijen pleiten voor een consistent en integraal beleid dat private investeringen aanmoedigt en niet ontmoedigt. Er zijn nog veel institutionele barrières. Hierbij valt met name te denken aan marktmacht van bepaalde partijen of wetgeving. Deze barrières bemoeilijken een intrede van nieuwe duurzame opties in de markt, ook als deze opties uiteindelijk goedkoper zijn dan de huidige fossiele opties. Partijen die het klimaatprobleem willen aanpakken kunnen er niet omheen de beschikbare opties te verkennen en na te gaan welke institutionele belemmeringen er zijn. Pas dan kan bepaald worden welke combinatie van beleidsinstrumenten (wetgeving, investeringssubsidies, heffingen etc.) het meest geëigend is.

Vanuit de H<sub>2</sub> Dialoog worden de volgende bouwstenen aangedragen voor de ontwikkeling van een consistent integraal beleid.

#### *1. Stimuleer duurzame opties nu, niet later!*

Innovatie betreft zowel de verdere vraagbeperking als de gelijktijdige ontwikkeling van concepten en technologieën aan de aanbodkant van het energiesysteem. De gangbare manier van denken is dat eerst ingezet moet worden op besparing, daarna op schoon fossiel en pas in laatste instantie – 2030 of zelfs 2050 – op het grootschalig aanwenden van duurzame bronnen (zon, wind en biomassa). De H<sub>2</sub> Dialoog komt daarentegen tot de conclusie dat duurzame concepten met dan wel zonder waterstof vanaf heden al de mees-

te mogelijkheden bieden voor de reductie van CO<sub>2</sub>. Er is alle aanleiding om deze krachtig te stimuleren.

## *2. Denk in integrale concepten voor systeemverandering*

Een belangrijk inzicht betreft het belang en de kracht van het denken in integrale concepten voor systeemverandering. Integrale concepten omvatten een combinatie van technologieën die in onderlinge samenhang worden ontwikkeld en uitgetest. In de huidige transitiepraktijk wordt nog veel in gescheiden categorieën gedacht (warmte en elektriciteit, stationair en mobiel, centraal en decentraal, sectorgewijs). Het idee dat wij met besparingsmaatregelen de ambitieuze doelstelling voor 2020 kunnen halen berust op een misvatting. Het gaat er om te zoeken naar een mix van vraagbeperking in combinatie met duurzaam aanbod, zodat 100% reductie gerealiseerd wordt in huizen, voertuigen en fabrieken. Niet alleen bieden integrale concepten meer zicht op feitelijke kansen voor de overgang naar een duurzaam energiesysteem zonder broeikasgasemissies. Een bijkomend voordeel is dat een integrale aanpak kan bijdragen aan een doelmatiger inzet van publiek geld (afnemende kosten per vermeden ton CO<sub>2</sub>).

## *3. Bied ruimte voor concurrerende alternatieven*

Het transitiebeleid zou sterker moeten inzetten op diversiteit in kennis. Er is niet één weg naar Rome. Bij de productie van kennis is het nodig om verschillende kennisbronnen aan te boren, waaronder kennis uit het buitenland. De onderzoeksagenda dient ruimte te bieden aan concurrentie; monopolisering van onderzoek dient in beginsel te worden tegengegaan. Een middel hiertoe is een proces dat voorziet in een open dialoog tussen pleitbezorgers van verschillende opties. Ook kan de maatschappij betrokken raken bij de discussies op dit gebied en kan de maatschappelijke relevantie van veelal technische discussies in kaart worden gebracht.

## *4. Stimuleer launching costumers*

Overheden, milieuorganisaties, bedrijven, financiële instellingen en andere maatschappelijke partijen waaronder burgers, kunnen als launching costumers optreden om duurzame opties in de markt te zetten. Hiermee wordt bedoeld op een bijdrage waarmee opschaling van de productie mogelijk wordt. Er zijn drie criteria bij het nemen van een besluit hier toe. Ten eerste moet de optie wezenlijk worden geacht voor het beschikbaar maken van duurzame alternatieven. Ten tweede moeten marktpartijen bereid zijn tot substantiële investeringen. Ten derde moet er vertrouwen zijn in de eindigheid van de (overheids)steun. Voorbeelden van situaties waarin launching costumers gewenst zijn komen hieronder aan de orde.

## *5. Stimuleer de ontwikkeling van brandstofceltechnologie*

In alle in de H<sub>2</sub> Dialoog behandelde concepten voor systeemverandering speelt brandstofceltechnologie (met of zonder H<sub>2</sub>) een beslissende rol. De Nederlandse overheid zou er goed aan doen om, in overleg met private partijen en onderzoeksinstituten, te komen tot een Nationaal Centrum voor Brandstofceltechnologie dat zich richt op het ondersteunen van de ontwikkeling en commercialisering van brandstofcellen. Het is hierbij van belang dat grote en kleine bedrijven samenwerken en dat nieuwkomers een kans krijgen.

## Aanbevelingen voor de gebouwde omgeving

De H<sub>2</sub> Dialoog heeft twee voorbeelden van integrale verduurzamingsconcepten voor de gebouwde omgeving besproken. Dit zijn de Kas als energiebron / Zonneterp, en De Stoere Houtman. In het concept Kas als energiebron / Zonneterp is een koppeling gemaakt tussen twee oorspronkelijk gescheiden sectoren, de gebouwde omgeving en de glastuinbouwsector (tuinderkas), waarbij woningen en kas onderling gebruik maken van reststromen, water en energie. De Stoere Houtman verwijst naar de gelijknamige vereniging van huiseigenaren in Arnhem die er voor gekozen heeft een duurzaam energiesysteem voor de wijk tot stand te brengen. Het potentieel voor integrale verduurzamingsconcepten voor de gebouwde omgeving is met deze twee concepten niet uitgeput. Maar wanneer alleen al deze concepten optimaal worden benut, biedt decentraal duurzaam in de gebouwde omgeving een reductiepotentieel van circa 25 Mton CO<sub>2</sub> in 2022. Hiermee zou Nederland bijna terug zijn op het emissieniveau van 200 Mton van 1990. Daarom zouden deze concepten een kans moeten krijgen. Ongetwijfeld zijn of komen er andere concepten, waarvoor onderstaande aanbevelingen ook gelden.

### *6. Faciliteer innovatieve concepten zoals de Kas als Energiebron / Zonneterp en de Stoere Houtman*

Teneinde innovatieve concepten te faciliteren dient eerst systematisch verkend te worden welke institutionele barrières er zijn die de mogelijkheden van burgers om zelf hun nutsvoorziening ter hand te nemen beknotten. Het gaat dan onder meer om belemmeringen in de bestaande wet- en regelgeving maar bijvoorbeeld ook om de hoge kosten die energiebedrijven in rekening kunnen brengen indien reservecapaciteit moet worden onderhouden. Nieuwe vormen van privaat initiatief en van coproductie tussen burgers en energiebedrijven dienen te worden bevorderd. Zolang wettelijke beperkingen niet zijn weggenomen kan vrijstelling worden verleend voor concrete projecten. Juist ook bij dit type projecten is een goede samenwerking nodig tussen rijk, provincies, gemeenten en energiebedrijven.

### *7. De overheid als launching costumer*

Bij projecten als de Kas als Energiebron / Zonneterp en de Stoere Houtman zal de rijksoverheid zo mogelijk in samenwerking met andere partijen als launching costumer moeten optreden. Hierbij gelden de criteria die onder aanbeveling 4 worden genoemd.

### *8. Neem institutionele barrières voor decentrale opwekking weg*

Regelingen die consumenten ontmoedigen over te gaan tot de aanschaf van duurzame opties moeten worden aangepast. Hierbij valt met name te denken aan de vergoedingsregeling voor de levering van decentraal duurzaam geproduceerde elektriciteit en de dubbele energiebelasting die consumenten zouden betalen bij de inzet van micro-wkk.

### *9. Ontwikkel nieuwe financiële arrangementen*

Wanneer decentraal duurzame oplossingen terrein gaan winnen moeten het Rijk en lokale overheden rekening houden met derving van inkomsten uit aardgas, milieuheffingen en gemeentelijke heffingen (rioolbelasting, afvalheffing). De overheid zou kunnen zoeken naar nieuwe inkomstenbronnen, bijvoorbeeld door als co-investeerder op te treden in

decentraal duurzame infrastructuur ontwikkeling. Het is beter hier nu vast over te gaan nadenken dan later met ad hoc beleid te komen dat als een barrière voor implementatie van duurzame opties zal worden beschouwd.

#### *10. Besteed aandacht aan veiligheid*

De decentralisatie van de productie en het gebruik van duurzame energie en waterstof, alsmede de diversificatie van toegepaste energietechnologieën, moet gepaard gaan met een toenemende aandacht voor veiligheid en de beleving van veiligheid onder betrokkenen.

#### *11. Stimuleer duurzame energieconcepten in de nieuwbouw, renovatie en bestaande particuliere voorraad*

Het stimuleren van opschaling van duurzame energieconcepten is gebaat bij een nationale inventarisatie van initiatieven van gemeenten, woningbouwcorporaties en projectontwikkelaars, om te beginnen voor de periode tot 2015. Deze inventarisatie wordt gebruikt om lokale partijen te informeren over de mogelijkheden tot verduurzaming. Een campagne kan particuliere huiseigenaren en verhuurders prikkelen om in samenwerking duurzame concepten te implementeren in de bestaande bouw. Hierbij dient de ervaring opgedaan met participatie in nieuwbouw en renovatie door bewoners, eigenaren en lokale overheden te worden betrokken.

#### *12. Ontwikkel een wetgevingstraject voor klimaatneutrale gebouwen*

Wanneer dankzij launching costumers en andere instrumenten concurrerende concepten voor een klimaatneutrale gebouwde omgeving beschikbaar zijn, dan verdient het aanbeveling om een wetgevingstraject in te zetten (vanaf 2012). Het adagium is: alleen nog maar 100% klimaatneutrale huizen en kantoren. Het verdient aanbeveling om, zonder direct een exact tijdpad te noemen, dit voornemen nu al bekendheid te geven.

### **Aanbevelingen voor de wegtransportsector**

De H<sub>2</sub> Dialoog heeft verschillende opties voor verduurzaming van het wegtransport besproken. Het referentiebeeld zonder waterstof is de grootschalige penetratie van bio-brandstoffen (vermengd en onvermengd). De dialoog heeft met name twee routes verkend, te weten aardgas-waterstofmengsels (hythane) en het waterstof-brandstofcel voertuig. Gebruik van brandstofcellen heeft de hoogst denkbare rendementsverbetering tot gevolg en scoort het hoogst bij het bestrijden van lokale luchtverontreiniging. Waterstof, geproduceerd met CO<sub>2</sub>-opslag zal tot aanzienlijke hogere emissiereducties leiden dan wanneer de CO<sub>2</sub> niet wordt opgeslagen. Een optie die aandacht verdient is groene methanol als drager van groene waterstof. De transportsector kan in 2022 reducties in de orde van 23 Mton CO<sub>2</sub>-eq. realiseren. Hiervan komt een kleine 7 Mton voor rekening voor de routes waarin waterstof een rol speelt. In combinatie met de reducties in de gebouwde omgeving duikt Nederland dan onder de 200 Mton, het Nederlandse niveau van 1990. De H<sub>2</sub> Dialoog breekt een lans voor het waterstof-brandstofcelvoertuig. Naast enkele specifieke stimuleringsmaatregelen, zal dit voertuig profiteren van sectorbrede maatregelen gericht op een algehele bevordering van schone en zuinige voertuigen.

### *13. Neem sectorbrede maatregelen*

Voor de transportsector, waar klimaatvriendelijke alternatieven al in zekere mate beschikbaar zijn, is generiek sectorbreed beleid nodig om de klimaatdoelstellingen te halen. Mogelijke instrumenten zijn differentiatie van accijnzen en wegenbelasting. Het verdient aanbeveling om direct een project te starten dat moet uitwijzen hoe dit beleid vorm moet krijgen, zodat de schoonste en meest efficiënte voertuigen het beste af zijn. Het huidige subsidiebeleid met betrekking tot de aanschaf van schone auto's alsmede het huidige beleid gericht op het bijmengen van kleine percentages biobrandstoffen zijn in verband met de ambitieuze klimaatdoelstellingen niet toereikend en verdienen aanvulling.

### *14. Maak geen onderscheid bij toerekening emissies*

Bij de toerekening van emissies geldt op dit moment het principe dat emissies worden toegerekend aan de sectoren waar zij daadwerkelijk plaatsvinden. Zo worden de emissies uit de auto in Nederland toegerekend aan de transportsector, de emissies uit de raffinaderijen worden toegerekend aan de industrie. De alternatieven voor conventionele fossiele transportbrandstoffen vormen een opmerkelijke uitzondering, omdat in deze gevallen vaak alle emissies in de keten (de akker, de waterstofproductie, enz.) worden toegerekend aan het voertuig. Om het beeld van wat mogelijk is aan innovatie zuiver te houden moet met één maat gemeten worden. Dit hoeft niets af te doen aan het streven om emissies over de hele linie terug te dringen.

### *15. Overheden als launching costumers van waterstof-brandstofcel voertuigen*

De Nederlandse overheden kunnen als launching costumer optreden ten behoeve van het eigen wagenpark en het stimuleren van schoon en zuinig openbaar vervoer.

### *16. Start regionale pilots*

Bepaalde regio's (Rotterdam, Amsterdam, Arnhem) bieden mogelijkheden tot pilots om waterstof-brandstofcel voertuigen in gebruik te nemen en de benodigde infrastructuur te ontwikkelen (vergelijk de initiatieven in de Rijnmond die momenteel worden ontwikkeld, werkgroep Waterstof, 2006).

### *17. Stimuleer groene waterstof voor de transportsector*

Het onsite produceren van groene waterstof uit groene methanol biedt wellicht kansen voor de transportsector. De beschikbaarheid van groene methanol, zowel grootschalig geproduceerd als uit lokale reststromen, dient te worden gestimuleerd. Het is van belang dat deze optie door private partijen wordt uitgewerkt en door de overheid waar nodig wordt ondersteund.

## **Aanbevelingen voor de energie-infrastructuur**

Uit de H<sub>2</sub> Dialoog komt naar voren dat de transitie naar een duurzaam energiesysteem wellicht een beslissende wending kan nemen door een stapsgewijze transformatie van de huidige aardgasinfrastructuur in een flexibele hythane infrastructuur. In de dialoog zijn de mogelijkheden besproken van het bijmengen van uiteindelijk 25% waterstof in de aardgasinfrastructuur rond 2020. Door toepassing van gas-scheidingstechnieken worden

afnemers in staat gesteld om hythane (het mengsel), methaan of waterstof af te nemen. Producenten kunnen gassen via de infrastructuur leveren, bijvoorbeeld lokaal geproduceerd aardgas uit biomassa of waterstof uit aardgas of overvloedige elektriciteit. De infrastructuur is *flexibel*, waardoor een zogenaamde lock-in in de vorm van een waterstofinfrastructuur wordt vermeden. De flexibele infrastructuur biedt ruimte aan verschillende typen micro-wkk. Integratie tussen de gas- en de elektriciteitsinfrastructuur kan de kwetsbaarheid voor storingen tegengaan, wat in het belang is van de leveringszekerheid (onder andere aanpassing aan klimaatverandering). In de beginperiode rond 2020 zal er rond de 12 Mton CO<sub>2</sub> worden bespaard. Gaandeweg zal het aandeel van groen gas en duurzame waterstof toenemen. In combinatie met de acceleratie van decentraal duurzaam zal het gebruik van fossiel aardgas allengs worden uitgefaseerd.

Geïnspireerd door het concept van de hythane infrastructuur, is in de marge van de H<sub>2</sub> Dialoog het concept ‘Gass River’ ontwikkeld dat gericht is op klimaatneutraliteit van het industriegebied Delfzijl / Eemshaven. Dit traject voorziet mede in CO<sub>2</sub>-opslag in een leeg gasveld.

Het concept van de flexibele energie-infrastructuur dient vooralsnog beschouwd te worden als een optie voor de onderzoeksagenda.<sup>5</sup> De doelstelling van dit onderzoek is het uitwerken van concrete alternatieven voor de huidige, op fossiel gebaseerde infrastructuur. Bij het uitwerken en vergelijken van alternatieven, bijvoorbeeld een hythane infrastructuur en een waterstof infrastructuur, wordt aandacht besteed aan aspecten als veiligheid, wettelijke inpasbaarheid en de kosten, zowel in termen van investeringen als energetisch rendement.

De deelnemers vanuit Gasunie aan de dialoog laten hierbij aantekenen dat de onderzoeksagenda geen valse verwachtingen mag wekken ten aanzien van een daadwerkelijke transformatie van de huidige gasinfrastructuur. Dit is een zeer complexe en omvangrijke opgave, waarbij implementatie rond 2020 niet kan worden gegarandeerd. De deelnemers vanuit ECN zien zodanige energetische bezwaren dat de flexibele energie-infrastructuur zich naar hun mening niet leent voor de onderzoeksagenda.

#### *18. Beleidsagenda: Houd rekening met waterstof in nieuw aan te leggen of te vervangen infrastructuur*

Er bestaat unanimiteit over de aanbeveling dat in de ontwikkeling van nieuwbouwprojecten rekening moet worden gehouden met de mogelijkheid dat er op termijn waterstof toegepast gaat worden. Dit betekent dat de nieuw aan te leggen infrastructuur hiervoor geschikt moet zijn.

#### *19. Onderzoeksagenda: Stimuleer praktijkgeoriënteerd onderzoek naar klimaatvriendelijke alternatieven voor de fossiele energie infrastructuur*

De innovatie van de energie-infrastructuur wordt gezien als een publieke taak. Maar in de onderzoeksfase zullen met name bedrijven en kennisinstellingen het voortouw moeten nemen. Het is in het belang van verduurzaming van de Nederlandse energievoorziening

---

<sup>5</sup> Dit onderzoek kan aansluiten bij het lopende traject Vergroening van Gas en bij het door Gasunie gecoördineerde project NaturalHy, waarin naast bijmengen ook ontmengen – onder meer met behulp van membraantechnologie – wordt onderzocht.

dat partijen die nu al een voortrekkersrol spelen, zoals Gasunie, deze rol ook in de toekomst zullen blijven waarmaken.

## *20. Specificeer onderzoeksprioriteiten*

Op basis van de H<sub>2</sub> Dialoog worden de volgende elementen voor de onderzoeksagenda op het gebied van de energie-infrastructuur genoemd:

- Bijmengen van waterstof in lokale en regionale aardgasnetten. Er zijn experimenten nodig om de haalbaarheid van veilige bijmenging van verschillende percentages waterstof te bepalen;
- Ontmengen van waterstof en aardgas, maar eventueel ook andere gassen, met behulp van membraantechnologie, pressure swing absorption en dergelijke, onder verschillende omstandigheden en bij verschillende percentages;
- Lokaal bijmengen van bijvoorbeeld waterstof veronderstelt onderzoek naar een goed monitoring- en bemeteringsysteem, waarbij gegarandeerde kwaliteit en veiligheid voor de afnemer voorop staan;
- Experimenten met elektrolyse om overtollige elektriciteit in het gasnet op te slaan;
- Experimenteren met diverse methoden om CO<sub>2</sub> af te vangen en op te slaan dan wel CO<sub>2</sub> te reduceren met behulp van thermische decompositie van koolwaterstoffen.

## 1. Inleiding

Dit rapport beschrijft een aantal routes om de verduurzaming van de Nederlandse energievoorziening vorm te geven. De suggesties vormen de weerslag van de bijdragen van zo'n vijftig betrokkenen, verbonden aan bedrijven, kennisinstituten, overheden en milieubeweging, die op persoonlijke titel hebben deelgenomen aan de *H<sub>2</sub> Dialoog*. In de *H<sub>2</sub> Dialoog*, gecoördineerd door het Instituut voor Milieuvraagstukken van de Vrije Universiteit Amsterdam, is de mogelijke bijdrage verkend van waterstof aan de verduurzaming van de Nederlandse energievoorziening.<sup>6</sup> Tijdens deze verkenning zijn de dialooggroepen bijgestaan door een extern panel van deskundigen die op twee momenten in het proces zijn betrokken.

Dit rapport is enigszins afwijkend van andere energie adviezen in Nederland doordat het berust op een uitgebreide stakeholder dialoog en niet op een bureaustudie of op de bereikte consensus in een adviescommissie. In een dialoog gaat het er om ruimte te bieden aan de verschillende inzichten die er bij partijen met verschillende waarden en belangen leven. Er wordt niet op voorhand vanuit gegaan dat een groep 'de waarheid' in pacht heeft. Daarom wordt in deze rapportage steeds stilgestaan bij de argumenten die voor en tegen een bepaalde optie pleiten. Zolang opties niet in de praktijk zijn uitgetoetst zijn er bezwaren en twijfels mogelijk die vaak berusten op verschillende aannames over wat belangrijk of wat wenselijk is. Het mogelijk maken van experimenten, pilots en demo's, oftewel praktijk gerelateerd onderzoek, zal in de nabije toekomst meer uitsluitel moeten geven over de haalbaarheid van die opties.

Dat er geen terughoudendheid is betracht bij het weergeven van de *verschillen van inzicht* die er leven maakt het rapport nog niet vrijblijvend. Voor het beleid worden politieke keuzes aangereikt om bepaalde veranderingen mogelijk te maken. Richtinggevend hierbij is het idee van *systeem innovatie*. Hierbij gaat het om veranderingen met grote consequenties, niet alleen in technologisch opzicht maar ook voor de maatschappelijke instituties, zoals de markt, de rol van de consument en de inbreng van de overheid.

De tekst van dit rapport alsmede de berekeningen die worden gepresenteerd zijn opgesteld naar aanleiding van de discussies in de *H<sub>2</sub> Dialoog*. Niettemin zijn de primaire auteurs geheel en al verantwoordelijk voor de inhoud van dit document. Tijdens de *H<sub>2</sub> Integratie Workshop* van 15 en 16 maart 2007 is het rapport besproken met de betrokken stakeholders en met externen. Vervolgens heeft er een schriftelijke commentaarronde plaatsgevonden op basis waarvan de auteurs het rapport hebben afgerond.

---

<sup>6</sup> De *H<sub>2</sub> Dialoog* is financieel mogelijk gemaakt door een subsidie van het NWO/ACTS programma Duurzame Waterstof ([www.nwo.nl/acts](http://www.nwo.nl/acts)). Daarnaast is bijgedragen vanuit het programma BSIK Klimaat voor Ruimte, SenterNovem en de Raad voor Ruimtelijk, Milieu en Natuur Onderzoek.





## 2. Politiek maatschappelijke context

Centraal in de vraagstelling van de H<sub>2</sub> Dialoog staat de overgang naar een duurzaam energiesysteem en de bijdrage van waterstof hieraan. Het gaat in de H<sub>2</sub> Dialoog niet om een geïsoleerd pleidooi voor het belang van de waterstof optie, maar om de vraag waar Nederland behoefte aan heeft bij de overgang naar een duurzame energiehuishouding.

De politiek maatschappelijke context voor dit rapport wordt gevormd door de volgende actuele problemen:

### Klimaatprobleem

Het klimaatprobleem staat hoog op de politieke agenda. Nederland zoekt mogelijkheden om over te schakelen naar een economie zonder broeikasgasemissies. Het terugdringen van het energieverbruik door betere isolatie en meer efficiënte apparaten is hiertoe een eerste vereiste. Maar hiermee zal geen klimaatneutrale economie ontstaan. Er is een systeemverandering nodig die leidt tot het beëindigen van het gebruik van fossiele brandstoffen dan wel een zodanig gebruik van fossiele bronnen dat er geen CO<sub>2</sub> in de atmosfeer terecht komt. De H<sub>2</sub> Dialoog draagt een aantal routes aan, met en zonder gebruik van waterstof, die binnen Nederland kunnen leiden tot circa 15% broeikasgasreducties over 15 jaar (ten opzichte van 1990). Met nadruk zij er op gewezen dat in de H<sub>2</sub> Dialoog een aantal opties die in het debat over reductiedoelstellingen in Nederland en de EU een rol spelen, zoals kolencentrales, kerncentrales en opties in het buitenland, niet zijn besproken.<sup>7</sup>

### Stedelijke luchtkwaliteit

De luchtkwaliteit in stedelijke gebieden wordt aangetast door onder meer de mobiele sector. Het gaat dan om emissies van met name fijn stof (PM<sub>10</sub>) en stikstofoxiden (NO<sub>x</sub>), maar ook koolwaterstoffen, koolmonoxide (CO) en zwaveloxiden (SO<sub>x</sub>). Het probleem is urgent want de slechte luchtkwaliteit levert gezondheidsproblemen op en op veel locaties in Nederland voldoet de luchtkwaliteit niet aan de EU-normen voor fijn stof en stikstofoxiden. Waterstof als brandstof voor de transportsector, bij voorkeur met gebruikmaking van brandstofcellen, kan bijdragen aan een aanmerkelijke verbetering van de (lokale) luchtkwaliteit.

### Voorzieningszekerheid

Een probleem voor de Europese en de Nederlandse energievoorziening is de internationale instabiliteit die gepaard gaat met militaire conflicten en de toenemende concurrentie met de opkomende economieën van Azië. Hierbij wordt in aanmerking genomen dat Europa op dit moment meer dan de Verenigde Staten is aangewezen op energielevering uit het Midden Oosten en hierdoor in beginsel kwetsbaarder is (Kingma & Suyker, 2005; CEB, 2006; Houweling en Amineh, 2003). De in dit rapport besproken routes betekenen

---

<sup>7</sup> In de eerste fase van het dialoogproces is kernenergie wel aan bod gekomen maar is als resultaat van het selectieproces (door deelnemers) besloten om deze verder niet in de dialoog te betrekken.

een vermindering in de afhankelijkheid van schaarse fossiele bronnen uit potentieel instabiele regio's.

### Leveringszekerheid

Een aantal factoren leidt tot een tendentiële teruggang van het hoge niveau van leveringszekerheid dat thans in Nederland bestaat. De infrastructuur wordt gaandeweg kwetsbaarder. Deels komt dit door het toenemende aandeel van wind en zon in de elektriciteitsproductie in Noordwest Europa en de fluctuaties in de levering van duurzame elektriciteit die hiervan het gevolg zijn. Het aandeel van met name wind zal de komende decennia naar verwachting sterk toenemen. Voor een ander deel wordt kwetsbaarheid veroorzaakt door klimaatverandering en de extreme weersomstandigheden die hier het gevolg van zijn, zoals stormen, hitte, droogte en plotselinge hoge waterstanden. Deze weersomstandigheden hebben mogelijk negatieve gevolgen voor de productie, het transport en de levering van energie, vooral elektriciteit. De mate en het tempo waarin deze problemen zich gaan voordoen zullen nog nader moeten worden onderzocht. De in dit rapport aangedragen routes kunnen Nederland op dit punt weerbaarder maken.

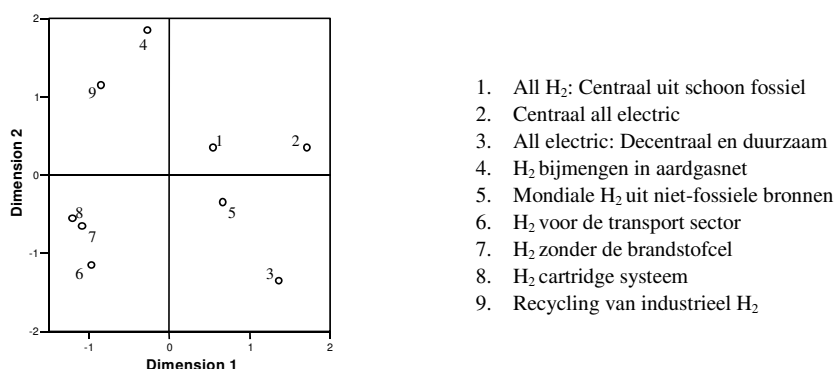
### Keuzevrijheid afnemers

Liberalisering van de energiemarkten in Europa versterkt de concentratie in de sector en leidt daardoor tot een afname van concurrentie. Voor de consument betekent dit een dreigende inperking van de mogelijkheid om te kiezen tussen verschillende aanbieders en verschillende producten. Verduurzaming van de energievoorziening zal kunnen leiden tot product differentiatie, meer concurrentie in het aanbod en hiermee tot een grotere keuzevrijheid van de consument. Dit is met name van belang, omdat in de transitiefase niet alle afnemers gebaat zijn bij dezelfde opties op hetzelfde moment. Dit rapport draagt routes aan die toetredingsbeperkingen voor nieuwkomers op de markt kunnen wegnemen en die het koplopers mogelijk maken om voorop te lopen zonder te moeten wachten op achterblijvers. De beperking van de keuzevrijheid van consumenten heeft daarnaast ook een sterke fysieke component omdat het gebruik van een infrastructuur veelal een grens stelt aan de diversiteit van aanbieders, producten en afnemers. Dit geldt voor het elektriciteitsnet in die zin dat ongestuurd decentraal elektrisch vermogen moeilijk op de bestaande infrastructuur kan worden geplaatst. In nog sterkere mate geldt dit voor het aardgasnet waarin alleen gasmengsels binnen strenge Wobbe-grenzen kunnen worden getransporteerd van de aanbieder naar de klant.

Al deze elementen uit de politiek maatschappelijke context zijn in dit rapport van belang voor het beoordelen van opties en concepten. Alleen de bijdrage aan de CO<sub>2</sub>-problematiek is evenwel cijfermatig onderbouwd.

### 3. Werkwijze H<sub>2</sub> Dialoog

Het project H<sub>2</sub> Dialoog is gestart in maart 2004 en heeft een looptijd van vier jaar. De dialoog is gevoerd in drie groepen die sinds de aanvang van het proces zijn aangeduid als Groep 1 (waterstof via de bestaande aardgasinfrastructuur), Groep 2 (waterstof in de wegtransportsector) en Groep 3 (decentraal en duurzaam geproduceerde waterstof in de gebouwde omgeving). Deze dialooggroepen zijn geformeerd op basis van een uitgebreide sociaal-wetenschappelijke analyse van de verschillende beelden en opvattingen over de duurzame waterstofeconomie. Aanvankelijk leidde een ronde van 65 diepte interviews (Van de Kerkhof et al., 2005a) tot de identificatie van negen waterstofbeelden en één niet-waterstof referentiebeeld. Op een eerste workshop (april 2005) werden met behulp van de ‘repertory grid methode’ de in de ogen van de deelnemers meest saillante waterstofbeelden geselecteerd. De repertory grid methode (afkomstig uit de constructieve psychologie; Kelly, 1955 en Fransella et al., 2004) faciliteerde een systematische vergelijking van steeds drie verschillende beelden en articuleerde de eigenschappen die de beelden van elkaar onderscheidden. Vervolgens werd op basis van een statistische analyse inzicht verkregen in de waterstofbeelden die de deelnemers als het meest onderscheidend beschouwden. Figuur 3.1 geeft de resultaten van de statistische analyse weer.<sup>8</sup> De (clusters van) beelden die zich het meest in de marge van de figuur bevinden worden door de deelnemers het meest saillant bevonden. Op basis van deze figuur heeft het projectteam aan de deelnemers drie waterstofroutes voorgesteld, te weten: Beeld 4 (‘bijmengen’), Beeld 6 (‘transportsector’), en Beeld 3 (‘decentraal en duurzaam’).



Figuur 3.1 De negen waterstofbeelden geplot in een tweedimensionaal figuur (Van de Kerkhof et al., 2005b).

<sup>8</sup> Figuur 3.1 is een visuele weergave van een zogenaamde HOMALS analyse. Om de betekenis van de statistische analyse te begrijpen wordt primair gekeken naar de (clusters) van beelden die weergegeven zijn als punten in de figuur. De x- en y-as hoeven als zodanig niet te worden geïnterpreteerd. Omdat we in de H<sub>2</sub> Dialoog op zoek waren naar verschillende, zelfs conflicterende, visies, hebben wij met name bekeken welke visies het meest ver weg ten opzichte van elkaar en / of ten opzichte van de oorsprong liggen.

De keuze voor deze drie uiteenlopende, wellicht zelfs concurrerende, routes past goed in het idee van de H<sub>2</sub> Dialoog om een *brede* verkenning uit te voeren naar de mogelijke rol van waterstof in de verduurzaming van het energiesysteem.

Vervolgens werkten de drie dialooggroepen bij deze beelden concurrerende waterstoftrajecten uit waarin aandacht werd besteed aan zowel de benodigde technologische innovaties als de institutionele context waarin deze innovaties zouden moeten worden geïmplementeerd. Op de zogenaamde Confrontatie Workshop in september 2006 werden gezamenlijk besproken en de sterkte en zwakke kanten van ieder traject geïdentificeerd. De dialooggroepen hebben daarna besproken in hoeverre de confrontatie aanleiding was om het traject te herzien. In een aantal gevallen spitsten kritische opmerkingen zich toe op concretisering van claims in de zin van getallen en berekeningen.

De H<sub>2</sub> Dialoog is besloten met een Integratie Workshop. Hier stonden de resultaten van de dialooggroepen opnieuw ter discussie. Maar, anders dan tijdens de Confrontatie Workshop, lag het accent nu niet op de verschillen en mogelijke concurrentie tussen de trajecten maar op de synergie en wederzijdse versterking. Het projectteam heeft de resultaten in de dialooggroepen vertaald in een aantal trajecten. Deze maken niet altijd gebruik van waterstof en ook niet op dezelfde wijze. Zij kunnen worden opgevat als concurrerend maar laten zich ook beschouwen als elkaar aanvullende opties die tezamen de kernproblemen voor de Nederlandse energievoorziening zouden kunnen oplossen. De doorrekening van de trajecten alsmede de kengetallen en aannamen zijn voorgelegd aan betrokkenen met kennis van zaken over de betreffende opties (zie Bijlage 1). Op de Integratie Workshop is het conceptrapport besproken.

Belangrijk voor de procesaanpak was het betrekken van externe deskundigen bij de discussie tijdens de Confrontatie en Integratie Workshops. Dit gebeurde enerzijds via het zogenaamde externe panel, een groep Nederlandse experts. Anderzijds werden binnenlandse en buitenlandse deskundigen ingeschakeld om een frisse kijk op de verschillende trajecten te bevorderen.<sup>9</sup>

---

<sup>9</sup> Het betreft Ulf Bossel (directeur van het European Fuel Cell Forum, bekend tegenstander van de waterstofeconomie), Amory Lovins (directeur Rocky Mountains Institute, bekend pleitbezorger van de waterstofeconomie), Nazim Muradov (Solar Research Institute, Florida, over CO<sub>2</sub>-vermijding in fossiele ketens), May Britt Hägg (Universiteit Oslo, over membraantechnologie ten behoeve van onttrekking van waterstof aan aardgas-waterstofmengels), Henk van Oosten (Innovatienetwerk Ministerie van Landbouw, staat aan de basis van het innovatie concept Kas als Energiebron) en Marcel Weeda en Frank de Bruijn (ECN - Unit Waterstof & Schoon Fossiel, co-referaat bij het concepteindrapport).

## 4. Bevindingen uit de H<sub>2</sub> Dialoog

In dit hoofdstuk worden per dialooggroep eerst de algemene bevindingen op hoofdlijnen gepresenteerd. Vervolgens volgt een meer gedetailleerde bespreking van de bevindingen per route of optie inclusief de ingebrachte bezwaren. Voor twee van de drie hoofdroutes ('wegtransport' en 'decentraal en duurzaam') kunnen de onderscheiden waterstof- en niet-waterstoftrajecten als complementair worden beschouwd. In de markt zullen zij naast elkaar bestaan en eventueel concurreren, bijvoorbeeld biobrandstoffen en waterstof voor de auto. In het geval van de keuze voor de flexibele energie infrastructuur, die ruimte biedt aan transport en afname van verschillende gassen waaronder waterstof, is de waterstofinfrastructuur een mogelijk referentie scenario.

### 4.1 Bevindingen decentraal duurzaam

Vrij algemeen wordt in Nederland en daarbuiten verwacht dat duurzame bronnen, zoals zon, wind en biomassa de komende decennia nog een zeer bescheiden rol zullen spelen in het adresseren van het CO<sub>2</sub>-probleem. In de H<sub>2</sub> Dialoog is evenwel naar voren gebracht dat decentraal duurzame opties, met dan wel zonder waterstof, beschikbaar zijn tegen naar het zich laat aanzien aanvaardbare maatschappelijke kosten. Wanneer dit inderdaad het geval is – en de verwachtingen van verschillende stakeholders lopen hierover uiteen – zal Nederland in staat zijn om in 2022 (15 jaar na dato van dit rapport) circa 25 Mton CO<sub>2</sub> te vermijden door het gebruik van energie uit zon, wind en lokale biomassa ten behoeve van woningen, kantoren en kassen. Uit de H<sub>2</sub> Dialoog zijn twee integrale routes naar voren gekomen, dat wil zeggen routes die 100% CO<sub>2</sub>-reductie realiseren waar zij worden toegepast. Tezamen schetsen zij het enorme potentieel van decentraal duurzame oplossingen. Dat zij hier worden behandeld wil natuurlijk niet zeggen dat zij een voorkeursbehandeling zouden verdienen ten opzichte van mogelijke concurrenten. Tijdens de Integratie Workshop hebben de deelnemers uitgesproken dat deze trajecten een kans verdienen, zij het met enkele kritische kanttekeningen over de inzet van waterstof.

#### Duurzaam zonder H<sub>2</sub> – De Zonneterp en de Kas als Energiebron<sup>10</sup>

Een veelbelovend concept *zonder* waterstof dat zich op kleine schaal in de praktijk al bewezen heeft is 'De Zonneterp'/Kas als Energiebron (zie Bijlage 2). In dit concept is een koppeling gemaakt tussen twee oorspronkelijk gescheiden sectoren, de gebouwde omgeving (woningen en utiliteiten) en de glastuinbouwsector (een tuinderkas). Deze koppeling bestaat eruit dat een 'industriel ecologisch systeem' wordt gerealiseerd waarin de woningen en de kas onderling gebruik maken van hun rest/surplus stromen, water en energie. Wij richten ons hier op energie.

Een tuinderkas vangt gedurende de zomer zoveel zonnewarmte in dat de kas gekoeld moet worden. In de huidige situatie wordt de kas in de winter verwarmd door aardgas te

---

<sup>10</sup> Het concept van de Zonneterp (zie <http://www.zonneterp.nl>) is besproken in de context van Groep 3 en is afkomstig van Noor van Andel.

verbranden. De Zonneterp/Kas als Energiebron is een concept waarin alle beschikbare energie efficiënt gebruikt wordt door het hele jaar heen.

De Zonneterp gebruikt de overvloedige warmte uit de kas, die volledig van duurzame bronnen afkomstig is (instraling van de zon en biomassa), waardoor sprake is van een duurzame energiesysteem. In zowel de woningen als de tuinderkas worden enkele technologische innovaties opgenomen (warmte/koude opslag, lage temperatuur warmtewisselaars) die ervoor zorgen dat o.a. overvloedige warmte in de zomer kan worden opgeslagen en tijdens de winter op efficiënte wijze beschikbaar komt voor verwarming van huishoudens en de tuinderkas. Voor de productie van CO<sub>2</sub>, een voedingsbron voor planten, wordt in de tuinderkas bovendien biomassa op innovatieve wijze omgezet in CO<sub>2</sub>, warmte en elektriciteit.

De tuinderkas is op deze wijze in staat volledig zonder gebruik van fossiele energie (aardgas) te opereren, hetgeen bij de aanname van 100% penetratie de belofte herbergt dat de Nederlandse glastuinbouw in 2020 geheel klimaatneutraal kan zijn (doelstelling LTO). Op basis van de huidige gegevens wordt 18,5 Mton CO<sub>2</sub> gereduceerd hetgeen 80% is van de huidige CO<sub>2</sub>-emissies van de glastuinbouw. Dit komt neer op ca. 68% van de huidige CO<sub>2</sub>-emissies van de woningen.<sup>11</sup>

In principe is iedere tuinderkas geschikt voor dit systeem. Bovendien heeft dit concept momenteel een groot draagvlak onder de glastuinders. Niettemin kent de Zonneterp fysieke beperkingen die zijn bepaald door de hoeveelheid en de geografische concentratie van kassen in Nederland, maar ook door landschapskenmerken, de aanwezigheid van aquifers en de ligging van de kassen ten opzichte van deze aquifers. Het bezwaar is geopperd dat het concept berust op een combinatie van op zichzelf al veelal innovatieve technieken. De zorg bestaat dat hierdoor veel kan misgaan in de praktijk. Een ander bezwaar is dat in de Zonneterp gebruik wordt gemaakt van een SOFC brandstofcel (Solid Oxide Fuel Cell) die zich in de praktijk nog niet heeft bewezen.

Uit gegevens over de Zonneterp blijkt dat bij het huidige kassenareaal ten hoogste 17% van de gebouwenvoorraad (7 miljoen gebouwen) kan profiteren van de Zonneterp. Bij benutting van een groter potentieel is de bouw van extra kassen noodzakelijk. Daar zou op zichzelf een economische ratio aan ten grondslag moeten liggen, die wellicht gevonden kan worden in extra productie in de vorm van energiegewassen.

### Duurzaam met H<sub>2</sub> – Concept De Stoere Houtman<sup>12</sup>

Een duurzame route waarbij waterstof wordt ingezet om duurzaam geproduceerde elektriciteit op te slaan, is ontleend aan het initiatief van de Arnhemse eigenaren vereniging De Stoere Houtman (zie Bijlage 3). Het betreft 288 woningen in de Arnhemse wijk Presikhaaf (138 bestaande woningen die gerenoveerd gaan worden en 150 nog te bouwen woningen) Deze route is gebaseerd op de wens om een zelfvoorzienende wijk te

---

<sup>11</sup> Hierbij is uitgegaan van 23 Mton CO<sub>2</sub>-emissie van de glastuinbouw in 2005, en 27 Mton CO<sub>2</sub>-emissie van de woningen ten behoeve van elektriciteit en warmtevoorziening. De uitstoot van utiliteitsbouw is niet meegerekend.

<sup>12</sup> Het concept Stoere Houtman is besproken in Groep 3 en is afkomstig van o.a. Huurman en Hof. In een aparte bijeenkomst van de H<sub>2</sub> Dialoog is dit concept onderworpen aan een back-casting analyse.

realiseren waarin bewoners op zelfstandige wijze met hun energie om gaan zonder daarbij afhankelijk te zijn van het elektriciteitsnet. Deze wens wordt versterkt door de verwachting dat de kwetsbaarheid van de huidige energie-infrastructuur zal toenemen naarmate extreme weersomstandigheden (waaronder extreme sneeuwval, storm en hitte) vaker gaan voorkomen. Verder is de route gebaseerd op de notie dat binnen het huidige beleidskaders, de terugleveringsvoorwaarden en tarieven ongunstig zijn en op de verwachting dat vanwege het toenemend aandeel duurzame elektriciteit het in de toekomst alleen maar moeilijker zal worden om het aanbod en de vraag van elektriciteit via het net te accommoderen.

In de Stoere Houtman hebben bewoners voor hun wijk een ontwerp laten maken inclusief kostenberekening voor een geheel duurzaam energiesysteem. In het ontwerp wordt een aantal opties gecombineerd. Enerzijds wordt een afdoende niveau van isolatie gerealiseerd, anderzijds wordt gebruik gemaakt van decentraal duurzaam aanbod. In het bijzonder wordt hierbij gedacht aan fotonvoltaïsche zonne-energie (PV) (zo mogelijk de door Nuon van Akzo Nobel overgenomen dunne film technologie Helianthos, die weliswaar laag efficiënt is maar ook zeer laag in prijs) en een nieuw type kleine windmolen (de nieuwe typen kleine windmolens hebben gemeen dat zij weinig inbreuk maken op de ruimte en een aantrekkelijk ontwerp kennen). Met behulp van een geavanceerd model is berekend dat er over een jaar genomen voldoende stroom wordt geproduceerd.<sup>13</sup> Deze is alleen in beperkte mate terug te leveren aan het net, omdat bij een te hoge teruglevering de vergoeding voor de verbruiker vervalt. Daarom wordt het voordelig voor de verbruiker om overtollige elektriciteit via elektrolyse om te zetten in waterstof en wordt voor de wijk een door een brandstofcel aangedreven mini-wkk<sup>14</sup> centrale opgezet. Het Stoere Houtman concept gaat niet alleen uit van de opslag van overtollige elektriciteit in waterstof maar ook van de (ondergrondse) opslag van overtollige warmte en distributie van warmte via een lokaal warmtenet.

---

<sup>13</sup> Ter illustratie van de mogelijkheid om een overschot aan elektriciteit te produceren: uitgaande van 30 m<sup>2</sup> PV-cellen met een effectief rendement van 12% en een gemiddelde zoninstraling in Nederland van 2,7 kWh per dag, zal een dak gemiddeld 9,7 kWh per dag produceren. Telt men hierbij op de elektriciteit die geproduceerd kan worden met behulp van kleine windmolens, dan komt dit getal nog hoger uit en zal ook het verloop gedurende de dag en het jaar gelijkmatiger zijn. Aangezien een gemiddeld Nederlands huishouden nu 9,6 kWh per dag aan elektriciteit verbruikt. Is het aannemelijk dat een overschot ontstaat. Voor zomerse piekmomenten geldt dit helemaal; zoninstraling gedurende een zomerse dag zorgt voor een aanzienlijk elektriciteitsoverschot op huishoudniveau. (zie ook Notitie van Stam, 15 mei 2006, Notitie: Energiestromen uit zon in Duurzaam Decentraal ten behoeve van Groep 3 van de H<sub>2</sub> Dialoog).

<sup>14</sup> Mini-wkk heeft betrekking op wijkniveau, micro-wkk op het niveau van een woning of een gebouw.



Wij gaan er van uit dat in 2022 10% van de gebouwen in Nederland op deze wijze is uitgerust.<sup>15</sup> Dit leidt tot een reductie van naar schatting 6 Mton CO<sub>2</sub>. De 'Stoere Houtman route' is ontwikkeld in coproductie met bewoners en heeft hierdoor behalve een technische ook een sterke sociale component. Dit biedt kansen om de maatschappelijke betrokkenheid en participatie bij de verduurzaming van de energievoorziening te verhogen. Het moet mogelijk worden geacht om, in samenwerking met bewoners, voor meer wijken een op maat gemaakt duurzaam energiesysteem te ontwikkelen.

In de dialoog zijn verschillende bezwaren van technische en economische aard ingebracht tegen dit concept. Een algemeen bezwaar is dat net als bij de Zonneterp gebruik wordt gemaakt van een stapeling van technieken. Hierdoor wordt het systeem kwetsbaar. De belangrijkste bezwaren richten zich echter op de kern van het concept, te weten het opslaan van overtollige elektriciteit. Aanvankelijk is vooral twijfel uitgesproken over de claim dat op piekdagen (met veel zon of harde wind) voldoende stroom kan worden opgewekt om aan de elektriciteitsvraag over een jaar genomen te voldoen. Er lijkt consensus dat dit in beginsel mogelijk is, al zal het nog wel in de praktijk bewezen moeten worden. Een bezwaar dat niet in de dialoog is weggenomen, richt zich tegen de wens om zelfvoorzienend te worden door overtollige elektriciteit op te slaan als waterstof. Energetisch is het verstandiger om deze elektriciteit aan het net te leveren en zonodig via het net op te slaan in een stuwmeer.<sup>16</sup> De transportverliezen zijn dan veel minder dan de conversieverliezen door omzetting naar waterstof en weer terug in elektriciteit. Weliswaar vormt de huidige slechte vergoeding voor teruglevering een sta-in-de-weg is voor levering aan het net. Maar, zo luidt de redenering: is het niet verstandiger om bij de politiek een goede terugleververgoeding te eisen? Als het in de toekomst financieel aantrekkelijk zou worden om overtollige elektriciteit te leveren aan het net, dan valt een belangrijk argument weg om elektriciteit op te slaan als waterstof. De Stoere Houtman stelt evenwel dat via de brandstofcel, ondanks het energetische verlies, ook in de warmtevraag zou kunnen worden voorzien.<sup>17</sup> Hiertegen richt zich evenwel een ander belangrijk bezwaar. Het wordt sterk betwijfeld of de PEM brandstofcel (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) in de warmtevraag kan voorzien. Zo'n brandstofcel levert immers meer elektriciteit dan warmte. De berekeningen wijzen vooralsnog uit dat in de warmtevraag kan worden voorzien, mits er een lokaal warmtenet wordt aangelegd. Een andere suggestie vanuit de dialoog is het inzetten van een warmtepomp die gebruik maakt van de elektriciteit van de

---

<sup>15</sup> De aanname lijkt aan de hoge kant. Maar er zijn twee argumenten om deze toch te hanteren. Ten eerste is deze optie zeker ook van toepassing op de bestaande voorraad. Ten tweede, de Nederlandse woningvoorraad van +/-7 miljoen groeit ieder jaar met zo'n 60.000 woningen (CBS Statline, 2007). Uitgaande van dezelfde groei over 15 jaar komt dit neer op 900.000 (=12% van huidige voorraad) extra woningen die op deze wijze gebouwd zouden kunnen worden. Bovendien gaat het hier om de netto toename van de woningvoorraad; telt men sloop en dan nieuwbouw hierbij op dan neemt het aantal potentiële woningen waarin het concept kan worden geïmplementeerd alleen maar toe. Als we nu alleen al de nieuwbouwvoorraad in aanmerking nemen dan is 10% penetratie van deze optie niet hoog geschat.

<sup>16</sup> Door enkele deelnemers is er ook op gewezen dat waterstof als middel voor lokale opslag minder efficiënt is dan bijvoorbeeld accu's of batterijen. Maar voor langdurige opslag lijken dit niet de juiste opties.

<sup>17</sup> Een ander argument is dat lokale opslag vanuit het oogpunt van leveringszekerheid beter is dan afhankelijkheid van een internationale super grid die steeds kwetsbaarder wordt.

brandstofcel. De warmte van de brandstofcel kan in dat geval gebruikt worden voor het tapwater in de huizen. Een consortium rond De Stoere Houtman zal een en ander nader gaan uitwerken. Een belangrijke vraag hierbij is niet alleen de keuze van de techniek, maar ook of en onder welke condities de investeringen die gemoeid zijn met de inzet van verschillende geavanceerde technieken kunnen worden terugverdiend.

De discussie over de Stoere Houtman kan ook worden beoordeeld in het licht van het rapport van de Werkgroep Waterstof (2006) van het Transitieplatform Nieuw Gas. Enkele deelnemers van deze werkgroep nemen ook deel aan de H<sub>2</sub> Dialoog. De Werkgroep Waterstof meent dat de stationaire waterstofroute minder evident is dan de introductie van waterstof in de transportsector. Toch liggen er voor waterstof kansen in de gebouwde omgeving. De werkgroep schetst een route waarin een experiment zoals de Stoere Houtman past. In het scenario Waterstoftransitie voor stationaire toepassingen (p.12 rapport Werkgroep Waterstof, 2006) wordt een demonstratie mini-wkk op waterstof in het vooruitzicht gesteld. Overigens wordt in het rapport afstand genomen van het idee om duurzame elektriciteit op te slaan als waterstof. Dit wordt gemotiveerd met de veronderstelling dat naar verwachting duurzame elektriciteit nog maar mondjesmaat een rol zal spelen: “Omdat ook in 2050 het bruikbare energieaanbod uit hernieuwbare bronnen nog niet overdadig zal zijn, moet de energiehuishouding zo efficiënt mogelijk zijn. Daar waar verliezen beperkt kunnen worden zal dat gebeuren. Dit heeft als consequentie dat duurzame elektriciteit direct gebruikt zal worden zonder tussenkomst van waterstof.” (p.5). Maar er wordt ook gesteld: “De stationaire toepassingen van waterstof worden pas echt interessant bij inzet van klimaatneutraal waterstof, maar kunnen niet worden genegeerd. Op langere termijn is de huidige situatie namelijk onhoudbaar. Ons eigen aardgas is over 30 jaar op...” (p.10). Op grond van de H<sub>2</sub> Dialoog kan de stelling dat stationaire toepassingen zullen moeten wachten tot het aandeel duurzame bronnen is toegenomen, worden omgedraaid: wanneer concepten als de Stoere Houtman blijken te werken, zal duurzame energie sneller dan verwacht een belangrijke rol spelen.

### Overheidsbeleid en andere actoren

Om de decentraal duurzame routes mogelijk te maken moet de overheid een helder beleidskader creëren met daarin ruimte voor pilots en normstelling, en door op te treden als launching customer. Met name door het verstrekken van eenmalige investerings-subsidies aan opties en projecten die een buitengewoon hoog CO<sub>2</sub>-rendement en innovatiepotentieel hebben maar die nu nog kampen met hoge kosten, kan de overheid het marktaandeel van kansrijke duurzame technologieën faciliteren. De overheid helpt zo om de marktintroductie van nieuwe concepten voor systeemverandering mogelijk te maken. Van tevoren moet dan wel duidelijk zijn om welke kosten het precies gaat, hoever de prijs bij opschaling omlaag kan en wat dan de kosten zullen zijn per ton vermeden CO<sub>2</sub>. Hiermee wordt tegen gegaan dat subsidies leiden tot prijsopdrijving en kartelvorming. Ook wordt tegemoet gekomen aan de kritiek op de afgeschafte MEP-regeling dat deze met name ten goede is gekomen aan de groten in de markt en niet aan de innovatieve partijen die de subsidieregeling werkelijk nodig hadden.

Bij het aanscherpen van de normstelling in wet- en regelgeving moet ruimte wordt gelaten aan hoe de norm wordt ingevuld. Huizen hoeven binnen afzienbare tijd geen CO<sub>2</sub> meer te emitteren. Afhankelijk van het type woning en de lokale omstandigheden kan CO<sub>2</sub>-neutraliteit worden gerealiseerd door maatregelen aan de vraagzijde (isolatie) te

combineren met duurzaam aanbod (duurzame warmte en stroom). Voorkomen moet worden dat vraagbeperkende opties eenzijdig profiteren, zodat afnemers geen mogelijkheid hebben om alternatieven aan de aanbodzijde te overwegen. Een andere barrière die de overheid kan wegnemen is in dit verband de regelgeving die beperkend is voor lokale duurzame energiesystemen. Misschien is ook op onderdelen nieuwe regelgeving nodig, bijvoorbeeld ten aanzien van de veiligheidsgarantie, het toelaten van nieuwe lokale energiebedrijven en ter voorkoming van dubbele heffingen. Er zal een actieve rol vereist zijn van gemeenten, provincies, projectontwikkelaars, bouwers en woningbouwcorporaties om systeemverandering in de gebouwde omgeving te realiseren.

## 4.2 Bevindingen voor de wegtransportsector

Voor de omschakeling van de wegtransportsector op schone brandstoffen en hoogefficiënte aandrijfsystemen worden drie routes onderscheiden. Van deze routes zal de biobrandstoffen route vermoedelijk al snel tot resultaat kunnen leiden. De andere routes, te weten aardgas met waterstof in combinatie met de verbrandingsmotor, en waterstof in combinatie met de brandstofcel, zullen zich naar verwachting later bewijzen. Tezamen kunnen deze trajecten in 2022 leiden tot een reductie van circa 23 Mton CO<sub>2</sub>. Hiervan komt een kleine 7 Mton voor rekening voor de trajecten waarin waterstof een rol speelt. De biomassa opties, bijmengen en volledige omschakeling, dragen circa 16 Mton bij. De bijdrage die voorzien is voor biobrandstoffen komt aardig overeen met de doelstelling van de transitiewerkgroep Groene Grondstoffen die voor 2030 een aandeel voorziet van 60% biobrandstoffen, maar hier staat tegenover dat het platform Duurzame Mobiliteit op 20% uitkomt.

Bij deze berekeningen past wel een kanttekening. Het is gangbaar om biobrandstoffen voor 70% als CO<sub>2</sub>-neutraal te beschouwen.<sup>18</sup> Wanneer biobrandstoffen op een schone(re) wijze worden geproduceerd en getransporteerd, benaderen zij een vrijwel volledige klimaatneutraliteit. Ten tweede wordt bij het bepalen van de emissies uit biobrandstoffen (en ook waterstof!) een benadering toegepast, waarbij emissies uit de gehele keten, om te beginnen op de akker, aan de auto worden toegerekend. Bij conventionele transportbrandstoffen gebeurt dit niet. Emissies uit de raffinaderijen worden toegerekend aan de industrie, terwijl emissies bij de winning en het transport van deze brandstoffen in het geheel niet worden meegenomen bij het berekenen van de Nederlandse emissies. Dit verklaart misschien waarom de klimaatemissies van de Nederlandse mobiele sector voor 2005 relatief bescheiden zijn, 19% in de MNP (Brandes et al., 2006) statistieken oftewel 36 Mton. Wij hebben aangenomen – en zijn hierin niet uniek (zie e.g. Kampman et al., 2005) – dat aan de sector nog een 8,2 Mton toegekend kan worden afkomstig uit de raffinaderijen.<sup>19</sup> Dit brengt de totale uitstoot van de sector transport anno 2005 op 44,2 Mton CO<sub>2</sub>.

---

<sup>18</sup> In de productiecyclus van biobrandstoffen wordt fossiele energie gebruikt. Dit zorgt ervoor dat biobrandstoffen niet 100% CO<sub>2</sub>-neutraal zijn. Men gaat er nu vanuit dat het gebruik van biobrandstoffen 30-60% CO<sub>2</sub>-emissies reduceert t.o.v. gebruik van zelfde hoeveelheid conventionele brandstoffen, en dat dit in de toekomst zal toenemen naar 60-80% (Menkveld et al., 2004).

<sup>19</sup> Deze 8,2 Mton wordt nu doorgaans toegerekend aan de industrie sector.

Tijdens de Integratie Workshop hebben de deelnemers uitgesproken dat Nederland moet inzetten op de meest zuinige en schone voertuigen en dat de introductie van waterstof aangedreven brandstofcelvoertuigen moet worden gestimuleerd.

### Referentiebeeld: Biobrandstoffen

Deze route bestaat min of meer uit twee deelroutes die hier beide zullen worden behandeld.

#### *Bijmengen van biobrandstoffen<sup>20</sup>*

Dit is een al bestaande route waarin biobrandstoffen worden bijgemengd bij de reguliere fossiele brandstoffen. Wij gaan uit van een bijmengpercentage dat in 2022 is opgelopen tot 20% (cf. te ontwikkelen richtlijn EU). Dit is van toepassing op 50% van de voertuigen in Nederland. Hiermee valt een besparing te realiseren van 6,6 Mton CO<sub>2</sub>.

#### *Volledig biobrandstoffen*

Deze route gaat uit van de veronderstelling dat in het jaar 2022 voor 30% van de voertuigen in Nederland conventionele fossiele brandstoffen volledig zijn vervangen door biobrandstoffen, met name puur plantaardige olie (ppo), biodiesel, ethanol, methanol of methaan uit biomassa. Dit zal leiden tot een emissiereductie van ruim 9,3 Mton CO<sub>2</sub> in de transportsector.

Er zijn verschillende bezwaren aan te dragen tegen de (bijgemengde of volledige) biobrandstoffenroute. Een veel gehoord bezwaar betreft dan de mogelijke concurrentie tussen voedselproductie en de productie van energiegewassen. Sommige deelnemers in de H<sub>2</sub> Dialoog hebben aangegeven op die ethische gronden bezwaren te hebben tegen de biobrandstoffenroute. Ook worden de biobrandstoffen als een gevaar gezien voor het behoud van biodiversiteit. Deze bezwaren gelden minder voor de tweede generatie biobrandstoffen. Een laatste bezwaar tegen biobrandstoffen is dat geen afscheid wordt genomen van verbranding. Hierdoor zullen de problemen van fijn stof en NO<sub>x</sub> een rol blijven spelen (en zijn dus aanvullende (technische) maatregelen nodig zoals katalysatoren en filters om deze problemen te verhelpen). Ook betekent het doorgaan met verbranding een minder efficiënt verbruik van energie dan wanneer gebruik wordt gemaakt van de brandstofcel.

#### *Aardgas / waterstof bij verbrandingsmotor<sup>21</sup>*

Een volgende route hebben wij gedefinieerd als aardgas (CNG; compressed natural gas) of aardgas- waterstofmengsels. Wat dit laatste betreft wordt uitgegaan van hythane, 75% aardgas en 25% waterstof in een reguliere verbrandingsmotor. Wij veronderstellen dat in 2022 10% van de voertuigen hiervan gebruik maakt. De hythane wordt oftewel bij de pomp geproduceerd door aardgas en waterstof 'onsite' te mengen, of er is een hythane infrastructuur ontstaan waar het mengsel rechtstreeks uit kan worden afgenomen. Wij gaan er voor deze route vanuit dat de waterstof wordt geproduceerd uit aardgas *met*

---

<sup>20</sup> Deze route staat centraal in het referentiebeeld van Groep 2 van de H<sub>2</sub> Dialoog maar is niet uitgebreid in de dialooggroep besproken.

<sup>21</sup> Deze route is met name besproken in Groep 2 van de H<sub>2</sub> Dialoog.

CO<sub>2</sub>-afvang en opslag. De aardgas en hythane route brengt een emissiereductie te weeg van 3,2 Mton CO<sub>2</sub>.<sup>22</sup>

Bezwaren tegen deze route hebben betrekking op de beschikbaarheid van hythane die niet onmiddellijk voor de hand ligt.<sup>23</sup> Naast beperkingen betreffende het ontbreken van een toereikende infrastructuur, moet worden beseft dat de introductie van aardgas/hythane in de transportsector resulteert in een enorme toename van de vraag naar aardgas. Het is de vraag welke effecten dit zal hebben op de beschikbaarheid en de prijs van deze schaarser wordende fossiele energiebron.

### Waterstof brandstofcelvoertuigen<sup>24</sup>

De derde route, die ook in het EU project HyWays (<http://www.hyways.de>) uitvoerig is onderzocht, maakt gebruik van waterstof in auto's en bussen die worden aangedreven door brandstofcellen. Naar verwachting zal het waterstof-brandstofcel voertuig rond 2015 commercieel op de markt komen.<sup>25</sup> General Motors bijvoorbeeld werkt nu aan maatregelen om technologie en comfort op te schalen en de kosten zodanig te verlagen dat een waterstof aangedreven brandstofcelauto op de markt gebracht kan worden tegen een prijs die concurrerend is met die van een vergelijkbaar niet-waterstof brandstofcelvoertuig. Ook andere automobielen producenten zijn in staat om waterstofvoertuigen te produceren. Er wordt op gewezen dat de introductie van de waterstofauto voor fabrikanten een aanzienlijke verlaging van de productiekosten kan opleveren (door goedkopere componenten en wereldwijde uniforme standaardisatie) en dat zij daarom gebrand zijn op succesvolle doorontwikkeling van de waterstofauto.

De brandstofcellen leiden tot een enorme verhoging van het rendement van het voertuig ten opzichte van verbrandingsmotoren, te weten een factor 2. In de dialoog is er op gewezen dat deze rendementsverhoging ook bij waterstofproductie uit gas zonder CO<sub>2</sub>-opslag tot een forse emissiereductie zal leiden. Op basis van de aannames in de dialooggroep wordt hier verondersteld dat in 2022 10% van de voertuigen gebruikt maakt van brandstofcel technologie met waterstof.<sup>26</sup> Wij hebben de CO<sub>2</sub>-uitstoot berekend bij waterstofproductie via steamreforming uit aardgas (SMR) *zonder* CO<sub>2</sub>-afvang en opslag.

---

<sup>22</sup> Deze berekening is gebaseerd op de vermindering van de CO<sub>2</sub>-inhoud van aardgas t.o.v. conventionele benzine met 20% en daarbovenop een vermindering van de CO<sub>2</sub>-uitstoot met 10% als gevolg van de toevoeging van 10%<sub>E</sub> aan het aardgas.

<sup>23</sup> Twee logistieke beperkingen kunnen hier optreden. Ten eerste hebben bestaande tankstations geen aardgasaansluiting die voor levering van aardgas als transportbrandstof geschikt is. Kiest men ervoor om waterstof met tankwagens naar het tankstation te brengen en onsite hythane te maken, dan zal het tankstation een grotere 'industriële' aansluiting op het aardgasnet moeten krijgen. Ten tweede is er geen hythane infrastructuur.

<sup>24</sup> Deze optie is besproken in Groep 2 van de H<sub>2</sub> Dialoog, maar ook in Groep 3 (in termen van systeemintegratie tussen mobiel en stationair).

<sup>25</sup> Presentatie van Luc Vinckx (General Motors Benelux) voor de dialooggroep, oktober 2006.

<sup>26</sup> Groep 2 in de H<sub>2</sub> Dialoog heeft verondersteld dat in het jaar 2030 40% van de personenauto's op waterstof rijdt. Er vanuit gaande dat de penetratie van de waterstofauto een S-curve ontwikkeling zal doormaken, zijn wij uitgegaan van een penetratiegraad van 10% in het jaar 2022, met een acceleratiefase rond het jaar 2020. Hiermee hebben wij een meer optimistische aanname gehanteerd dan de aanname van (plusminus) 7% die is gedaan in de studie *The Hydrogen Economy, Opportunities, Costs, Barriers, and R&D Needs* (Committee, 2004).

De Nederlandse CO<sub>2</sub>-uitstoot wordt verminderd met 2,4 Mton. De dialooggroep meent wel dat al snel na introductie van het waterstofbrandstofcelvoertuig gebruik gemaakt zal worden van waterstof uit fossiele bronnen met CO<sub>2</sub> opslag. Het CO<sub>2</sub>-reductiepotentieel zal dus allengs toenemen.

Ook is vanuit de dialooggroep de aandacht gevestigd op het beschikbaar komen van duurzame waterstof. Een optie die enkele deelnemers naar aanleiding van de Integratie Workshop onderzoeken betreft de mogelijkheid om groene waterstof te produceren uit groene methanol. Groene methanol zal naar zich laat aanzien binnenkort worden geproduceerd door Methanol Chemie Nederland te Delfzijl, de opvolger van Methanor. Ook zou in de nabije toekomst gebruik kunnen worden gemaakt van nieuwe Nederlandse technologie waarmee methanol geproduceerd kan worden uit lokale reststromen (het 'mobinol' concept). Opslag en transport van groene waterstof in de vorm van methanol zou een kans kunnen bieden om zonder grote infrastructurele ingrepen waterstof overal in Nederland beschikbaar te krijgen voor de transportsector. Dit zou onder de aanname van 10% penetratie in 2022 leiden tot een emissiereductie van 4,4 Mton, aanzienlijk meer dan de 2,4 Mton bij inzet van waterstof uit aardgas zonder CO<sub>2</sub>-opslag.

Ondanks de hoge verwachtingen die bij velen leven, zijn ook tegen waterstofaangedreven brandstofcelvoertuigen bezwaren ingebracht. Een eerste betreft de observatie dat het klimaatrendement van waterstof uit SMR zonder CO<sub>2</sub>-opslag wel eens geringer zou kunnen zijn dan dat van biobrandstoffen. In het verlengde van deze redenering ligt het pleidooi dat wie de voordelen van de brandstofcel ambieert en de nadelen van waterstof (uit fossiel) wil mijden beter af is met bio-methanol in combinatie met een brandstofcel (Bossel et al., 2003). Maar deze techniek is er nog niet en velen betwijfelen of die er ooit komt. Ook valt te denken aan technieken die er op gericht zijn om waterstof te produceren via 'thermische katalytische dissociatie' van fossiele koolwaterstoffen, waarbij een aanzienlijke reductie van CO<sub>2</sub> plaatsvindt (Muradov en Veziroglu, 2005). In dit verband valt ook te wijzen op de reeds langer bekende plasma technologieën om CO<sub>2</sub>-vrij waterstof uit fossiele bronnen (Van de Beld et al., 2003).

Een andersoortig bezwaar betreft de vraag hoe realistisch de verwachtingen zijn ten aanzien van de commercialisering van het brandstofcellen voertuig. Pessimisten wijzen er op dat noch de automobielen producenten noch de oliemaatschappijen er op dit moment belang bij hebben om waterstof brandstofcellen voertuigen op de markt te brengen. Dit zou ook blijken uit de steeds verschuivende aankondigingen van commerciële introductie (meest recent is vanaf 2020). Er zijn grote investeringen gedaan in bestaande installaties en productieprocessen. De hybride voertuigen zijn een groot succes. Alleen een autoproducent die de boot dreigt te missen zou wellicht de sprong kunnen wagen.

Volgens deze redenering kan Nederland op dit moment weinig doen om de internationale ontwikkelingen te beïnvloeden. Deze opvatting is op zichzelf niet in strijd met argumenten van technische en energetische aard die aangeven dat grootschalige introductie van waterstof juist in de transportsector het meest voor de hand ligt (zie ook Werkgroep Waterstof, 2006).

## Overheidsbeleid en andere actoren

De dialoog wijst uit dat in Nederland een stringent overheidsbeleid onmisbaar is om de CO<sub>2</sub>-emissies in de transportsector effectief terug te dringen. Een combinatie van strin-

gente heffingen op fossiele brandstoffen (accijnsvrijstelling van schone brandstoffen), normstelling en heffingen op de minder zuinige voertuigen (vrijstelling van belasting en lokale heffingen van de meest zuinige voertuigen) is een noodzakelijke voorwaarde om de omslag naar schone voertuigen te kunnen maken. Een ander voorstel is om schone voertuigen parkeerfaciliteiten te geven voor binnensteden. In principe zijn algemene maatregelen voor de sector voldoende om de omslag in gang te kunnen zetten. Het is niet uit te sluiten dat, eerst wanneer de biobrandstoffen krachtig zijn gestimuleerd, de brandstofcel auto zijn intrede in de markt zal doen. Met andere woorden: wanneer het om een 'level playing field' gaat, zouden biobrandstoffen als breekijzer kunnen dienen in plaats van, zoals wel wordt verondersteld, als een rem voor de waterstofaangedreven brandstofcelvoertuigen. Wanneer de brandstofcelauto op de markt komt zullen private partijen, zoals leasebedrijven, wellicht als 'early mover' (launching costumers) willen optreden.<sup>27</sup>

Net als in andere waterstof studies (zie bijvoorbeeld het advies van de Werkgroep Waterstof, 2006) zien de deelnemers aan de H<sub>2</sub> Dialoog Rijnmond als een geschikt gebied voor het experimenteren met en het ontwikkelen van waterstoftechnologieën, onder meer vanwege de beschikbare waterstofproductiecapaciteit in de raffinagesector en de aanwezige industriële waterstofinfrastructuur. Er worden mogelijkheden gezien om regionale transportvloten aan te sluiten op de aanwezige infrastructuur om zo op regionale schaal ervaring op te doen met waterstof en om de waterstofinfrastructuur verder uit te breiden. Een dergelijk initiatief vereist een samenwerking tussen overheid en bedrijfsleven, waarin de overheid ondersteunend beleid voert. Een verdergaand voorstel is dat de overheden als launching costumers optreden en voor het eigen wagenpark als eersten overschakelen op waterstofaangedreven brandstofcelvoertuigen. Eerder al zullen bussen kunnen overschakelen.

#### 4.3 Bevindingen Waterstof in de bestaande energie infrastructuur

Rond 2022 zal het wellicht mogelijk zijn om nog eens tenminste 11,9 Mton CO<sub>2</sub> te reduceren dankzij een systeemverandering in de Nederlandse energie-infrastructuur.<sup>28</sup> Het gaat hierbij niet om de aanleg van een waterstofinfrastructuur maar om de transformatie van de bestaande gasinfrastructuur naar een flexibele hythane-infrastructuur (75% aardgas en 25% waterstof) (De Wit et al., 2007 in Bijlage 4). Kenmerk van de infrastructuur is dat er zowel aardgas, hythane als waterstof van kan worden afgenomen en, binnen zekere grenzen, decentraal aardgas en waterstof aan de infrastructuur kunnen worden geleverd. De gas- en elektriciteitsinfrastructuur worden geïntegreerd in de zin dat op lokale schaal gas of waterstof kan worden omgezet in elektriciteit. Ook wordt overtollige elektriciteit opgeslagen als waterstof.

Dit traject moet vooralsnog worden beschouwd als een onderzoekstraject, waarbij de centrale vraag is het zoeken naar alternatieven voor de huidige op fossiel gebaseerde energie infrastructuur. De Integratie Workshop was verdeeld over dit traject. Sommigen zijn van mening dat het niet wezenlijk bijdraagt aan de verduurzaming van de energie-

---

<sup>27</sup> Maar dit zullen zij alleen doen als er afnemers zijn voor de tweedehands auto's.

<sup>28</sup> Dit concept is besproken in Groep 1 van de H<sub>2</sub> Dialoog.

voorziening en daarom noch een plaats verdient op de beleidsagenda noch op de onderzoeksagenda.

### Eerste stap: tot 5 % H<sub>2</sub> in het gasnet

Om in de praktijk te bezien of bijmengen van waterstof in het gasnet inderdaad zonder risico's mogelijk is, kan begonnen worden met proefnemingen en het toevoegen van een kleine hoeveelheid (tot 5%<sub>v</sub>) waterstof aan het aardgasnet. Hierbij moet rekening worden gehouden met de Wobbe-index, keurmerken voor eindgebruikersapparatuur, en andere veiligheidseisen. Bestaande apparatuur zal moeten worden getest op de mogelijkheid om waterstof bij te mengen zonder dat de veiligheid in gevaar wordt gebracht, en onderzocht zal moeten worden wat voor aanpassingen aan het gasnet eventueel nodig zijn om bijmenging mogelijk te maken. Dit onderzoek vindt al plaats in de projecten NaturalHY (Gasunie et al.) en Vergroening van Gas (TU Delft et al.).

### Tweede stap: Hythane infrastructuur - 25 % H<sub>2</sub> in het gasnet (rond 2020)

Dit concept kent nog tal van onzekerheden en bezwaren, maar omdat de potentiële voordelen groot zijn moet Nederland het concept zeer serieus nemen. De toevoeging van 25%<sub>v</sub> waterstof levert om te beginnen een reductie op van 10% van de emissies van het aardgasverbruik. Dit betekent een besparing van 7 Mton CO<sub>2</sub>.<sup>29</sup> In de berekening is het uitgangspunt dat de waterstof door middel van steamreforming (SMR) wordt geproduceerd uit aardgas en dat de CO<sub>2</sub> ondergronds wordt opgeslagen.<sup>30</sup> De mogelijkheid bestaat om met membraantechnologieën bij huishoudens of op wijkniveau waterstof aan het mengsel te onttrekken. Dit wordt onderzocht in het onderzoeksproject NaturalHy (Lie en Hägg, 2005; Hägg en Quin, 2006). Maar ook andere technieken kunnen worden beproefd (zie onder). Het belangrijkste voordeel is dat zo in Nederland overal waterstof beschikbaar kan komen zonder dat hiervoor een aparte (dure) infrastructuur moet worden aangelegd of een zwaar beroep wordt gedaan op wegtransport. Ten tweede, de CO<sub>2</sub>-emissiereductie bij de aanvangssituatie zal allengs toenemen naarmate huishoudens en bedrijven overstappen naar groen aardgas of waterstof. Afnemers hebben evenwel keuzevrijheid of en wanneer zij overstappen. Ten derde, in plaats van een natuurlijk monopolie voor aardgas biedt de infrastructuur de ruimte om lokaal gasvormige producten, zoals waterstof of groen aardgas, aan het net te leveren. Leveranciers van gasvormige producten kunnen dus, binnen bepaalde fysieke grenzen, gebruik maken van de infrastructuur. Een belangrijk argument is tot slot dat dit concept een integrale energie-infrastructuur voor Nederland naderbij brengt. Integratie tussen gas- en elektriciteitsinfrastructuur is mede van belang in het kader van de noodzakelijke aanpassing aan klimaatveranderingen en de bijkomende extreme weersomstandigheden.

Uit dit onderzoek zal onder meer moeten blijken in hoeverre een flexibele hythane infrastructuur tot veel verdergaande emissiereducties zal kunnen leiden. Bezien zal moeten worden in hoeverre de integrale infrastructuur qua veiligheid, kosten en andere aspecten

---

<sup>29</sup> Gebaseerd op een jaarlijks gasverbruik in Nederland van 40 miljard m<sup>3</sup> en een CO<sub>2</sub>-emissie van 1,77 kg per m<sup>3</sup> aardgas.

<sup>30</sup> Hierbij is wel de kanttekening gemaakt dat de feitelijke netto emissiereductie mede afhankelijk is van de energetische kosten van zowel het maken van de waterstof, het transport als de opslag van CO<sub>2</sub>. Hiervoor is een integrale berekening noodzakelijk.



opweegt tegen alternatieven, zoals de aanleg van een waterstofinfrastructuur voor heel Nederland. Overigens kunnen beide opties in de tijd in elkaars verlengde blijken te liggen. De toenemende penetratie van decentraal duurzaam in de gebouwde omgeving en de keuze voor een flexibele hythane infrastructuur kunnen namelijk betekenen dat de behoefte aan waterstof gaandeweg toeneemt. Het is goed denkbaar dat een waterstof ringleiding door Nederland zal worden aangelegd om in een toenemende behoefte aan waterstof te voorzien.

Het onderzoek zal ook praktijkonderzoek en demonstraties veronderstellen die op zichzelf innovatieve projecten kunnen zijn. Een voorbeeld dat in het kader van de H<sub>2</sub> Dialoog naar voren is gebracht is het Gass River concept (Bijlage 5). Geïnspireerd door het concept van de hythane infrastructuur is in de marge van de H<sub>2</sub> Dialoog het concept ‘Gass River’ ontwikkeld dat gericht is op klimaatneutraliteit van het industriegebied Delfzijl / Eemshaven. Centraal staat het idee dat verschillende gassen door een leiding worden getransporteerd. De bedrijven kunnen gassen aanleveren (met name CO<sub>2</sub>) en afnemen naar behoefte. Dit traject veronderstelt ook CO<sub>2</sub>-opslag in een leeg gasveld. Dit concept is als idee voor verdere uitwerking ingebracht in het stakeholder project CONcrete STAppen naar een DUurzame Eemsmond (Costa Due) van de provincie Groningen.<sup>31</sup>

Een aantal op zichzelf zelfstandig te implementeren opties kan als onderdeel van (het ontwikkelingsproces van) een integrale infrastructuur worden gezien.

### Micro-wkk op aardgas<sup>32</sup>

Huishoudens zullen de komende 15 jaar massaal overstappen naar micro-wkk met stirling motor. Wij gaan uit van 40% penetratie van de huishoudens in 2022. Dit levert een ietwat tegenvallende besparing van 2,6 Mton CO<sub>2</sub>. Deze besparing komt boven op de reductie die door hythane te behalen is.

De voordelen van deze optie zijn groot. De spreiding van opwekkingsvermogen vermindert de kwetsbaarheid voor storingen. De consument wordt deels producent en wordt daardoor geconfronteerd met de keuze: meer verbruiken en investeren in grotere opwekkingscapaciteit of investeren in een lager verbruik. De veronderstelling is gewettigd dat deze keuzemogelijkheid kan leiden tot substantiële afname van het elektriciteitsverbruik.

### Micro-wkk op waterstof<sup>33</sup>

Uit waterstof kan ten behoeve van wijken of individuele huishoudens micro-wkk worden opgewekt met behulp van brandstofcellen.

### Waterstof uit gas: diverse productietechnieken<sup>34</sup>

Met name bij kleine gasvelden kan naast of in combinatie met elektriciteit waterstof worden geproduceerd, waarbij verschillende scheidings- en productietechnieken kunnen

---

<sup>31</sup> Hierin participeren VU/IVM en RUG/ICS mede in het kader van het NWO GaMON programma.

<sup>32</sup> Deze optie is besproken in Groep 1 van de H<sub>2</sub> Dialoog.

<sup>33</sup> Deze optie is in zowel Groep 1 als Groep 3 aan de orde geweest.

<sup>34</sup> Deze technieken zijn vooral bediscussieerd tijdens de Confrontatie Workshop en Integratie Workshop.

worden toegepast. Bij het voorgenomen project ‘Zero Emission Power Plant’ (ZEPP) nabij Drachten zal aardgas worden gebruikt om elektriciteit te maken en zal CO<sub>2</sub> in het (lege) aardgasveld worden opgeslagen. Het is goed mogelijk om met deze technologie ook waterstof te produceren (zoals in het Gass River concept wordt voorgesteld, Bijlage 5).

Een andere optie is de thermische decompositie van koolwaterstoffen oftewel katalytische dissociatie (Muradov en Veziroglu, 2005), waarbij veel CO<sub>2</sub> wordt vermeden en pure koolstof wordt gevormd. Hergebruikopties voor koolstof zullen een belangrijk punt vormen voor de onderzoeks- en de beleidsagenda. Met name de bouwsector lijkt veel te kunnen bijdragen in de vorm van houtvervangers, betonvervangers voor bouw en waterwerken (door deze substitutie worden aanzienlijke emissies van cement en beton vermeden).

### Waterstofproductie uit elektriciteit via elektrolyse<sup>35</sup>

Integratie van het gas en het elektriciteitsnet kan tot stand worden gebracht door overschotten aan elektriciteit om te zetten in waterstof via elektrolyse. Het potentieel aan voor 2022 verwachte niet inpasbare windenergie is goed voor het langs deze weg vermijden van 2,3 Mton CO<sub>2</sub>. Deze hoeveelheid is al voldoende om 1%<sub>v</sub> waterstof aan het aardgasnet toe te voegen. Wij achten het gerechtvaardigd om in dit geval het hele potentieel te rekenen. In de berekening wordt namelijk uitsluitend uitgegaan van de hoeveelheid elektriciteit uit (geplande) Nederlandse windmolenparken als bron van overtollige elektriciteit; de wind van elders (Duitsland) is hierin niet meegenomen. Op dit moment leidt deze wind bij tijd en wijle al tot een behoorlijk overschot op het Nederlandse net en behoorlijke problemen op het Europese net. Ook kan gevoeglijk worden uitgegaan van een hoger surplus naarmate decentrale opwekking een impuls krijgt.

### Bezwaren

De ontwikkeling van dit concept heeft binnen en buiten de H<sub>2</sub> Dialoog veel discussie losgemaakt. Hieronder wordt eerst ingegaan op de discussie in de H<sub>2</sub> Dialoog. Vervolgens wordt deze in de context geplaatst van het rapport van de Werkgroep Waterstof van het transitieplatform Nieuw Gas.

Aanvankelijk concentreerde de discussie in de dialoog zich op een traject waarin uitsluitend wordt bijgemengd tot 25%<sub>v</sub> waterstof. Als voordelen werden genoemd de goede verbrandingseigenschappen van hythane<sup>36</sup> en het feit dat niet noodzakelijk de beste kwaliteit waterstof hoeft te worden gebruikt. In sommige nieuwbouwwijken zou direct een waterstof infrastructuur kunnen worden aangelegd. In deze fase van de dialoog werd de bijmengoptie dus met name als een transitieoptie gezien die uiteindelijk zou leiden tot een algehele waterstofinfrastructuur. In de dialooggroep was al een aantal bezwaren geuit, met name door de deelnemer vanuit Gasunie. Technische en veiligheidsproblemen

---

<sup>35</sup> Deze optie is in alle groepen aan de orde geweest, zij het in verschillende toepassingen (onsite waterstofproductie op het tankstation, centrale elektrolyse om het hythane net te voeden, elektrolyse op wijk-of huisniveau om lokale waterstofbuffers te creëren).

<sup>36</sup> Overigens wordt dit standpunt niet door alle deskundigen gedeeld. Een nadeel van hythane betreft onder meer een toename van NO<sub>x</sub> emissies.

als verbrossing van het gasnet en het weglekken van waterstof zijn aan de orde geweest. Het is nog onduidelijk in hoeverre deze problemen zich in gelijke mate zullen voordoen voor het hoge, midden- en het lage druk gasnet. De veranderde verbrandingseigenschappen van het gas met 25% waterstof ten opzichte van ‘gewoon’ aardgas hebben grote gevolgen voor de eindgebruiksapparatuur. Een belangrijke randvoorwaarde is dat de Wobbe-index voorschrijft wat de (energetische) kwaliteit moet zijn van het gas in de leidingen. Deze kan niet zomaar worden aangepast. Ook is opgemerkt dat er in EU verband behoefte bestaat aan een betere afstemming tussen nationale Wobbe-indexen. De dialooggroep meent dat deze bezwaren goed onderzocht moeten worden, omdat zij een serieuze barrière kunnen vormen voor het realiseren van het eindbeeld.

Tijdens de Confrontatie Workshop is dit traject van verschillende kanten bekritiseerd. Zo werd door een deelnemer aan de discussie vanuit de milieubeweging opgemerkt dat louter de CO<sub>2</sub> winst voor hem onvoldoende reden zou zijn om met bijmengen verder te gaan. Door deelnemers vanuit het ECN werd opgemerkt dat bijmengen een verspilling is van waterstof: waarom een grand cru mengen met een slobberwijn, luidde de kritiek. Want je bent de grand cru (de waterstof) kwijt. Via de videoconferentie kwam Amory Lovins met de suggestie dat bijmengen een goed idee is, mits het mogelijk wordt om de waterstof vervolgens weer uit het mengsel te halen.<sup>37</sup> Naar aanleiding van deze opmerking is in de dialooggroep het idee centraal komen te staan dat de gasinfrastructuur meer kan betekenen dan louter het leveren van aardgas. Het gasnet kan worden gezien als transporteur van verschillende gassen.

Tijdens de Integratie Workshop werden zowel bijmengen als ontmengen heftig bekritiseerd. In zijn co-referaat bij het conceptrapport bracht Marcel Weeda (ECN) verschillende argumenten naar voren. Zijn eerste kanttekening betreft de duurzaamheid van het concept. Deze ligt in het verlengde van het eerder aangehaalde bezwaar tegen de inzet van micro-wkk met brandstofcellen in de stationaire sector. Als “klimaat neutraal” of duurzaam waterstof naar de huizen wordt gedistribueerd, en vervolgens in warmte en kracht (WK) wordt omgezet, is de opgewekte elektriciteit en warmte ook klimaat neutraal of duurzaam. De CO<sub>2</sub>-uitstoot per opgewekte kWh (elektrisch of thermisch) is daarmee een stuk lager dan die van de aardgas gedreven WK. Vanuit de bron bezien (elektriciteit uit zon PV of wind), hoeft dit echter helemaal niet optimaal te zijn. Die elektriciteit kan bij directe inzet (via levering aan het net) wel eens veel meer CO<sub>2</sub>-uitstoot vermijden, zeker zolang de centrale elektriciteitsproductie voor het grootste deel met fossiele bronnen wordt opgewekt. Hoe dan ook gaat de route via waterstof naar stationaire toepassingen met veel energieverlies gepaard. Waar die verliezen door directe inzet kunnen worden beperkt, moet dat gebeuren. Vanuit deze argumentatie is de verduurzaming van de Nederlandse energievoorziening meer gebaat bij levering van decentraal opgewekte elektriciteit aan het net (met hierbij een passende vergoeding voor de private leverancier) dan omzettingen in waterstof en weer in elektriciteit.

Een tweede argument betreffende de duurzaamheid sluit aan bij het bezwaar dat waterstof op een verkeerde manier wordt ingezet wanneer het wordt gemengd met aardgas. De

---

<sup>37</sup> Lovins had wel eens van een Nederlandse expert begrepen dat dit waarschijnlijk mogelijk is, zo vertelde hij. Op dat moment was er niemand aanwezig die zich realiseerde dat ontmengen deel uit maakt van het EU NaturalHY-project, geleid door Gasunie.

hythane wordt immers verbrand in de micro-wkk op stirlingmotor. Vandaar het advies: waterstof verbranden om warmte te produceren? Niet doen!

Daarnaast is er nog een aantal technische argumenten om aan te geven dat bijmenging en decentrale ontmenging een onbegaanbare weg zijn. Het belangrijkste argument is dat bij relatief kleine hoeveelheden waterstof (in de orde van 10%<sub>v</sub>) ontmenging zonder onacceptabel energieverlies onmogelijk is. Met dit punt werd stelling genomen tegen de suggestie in de presentatie van May Britt Hägg (Universiteit Oslo)<sup>38</sup> dat onttrekking van waterstof aan aardgas-waterstofmengels met behulp van membraantechnologie waarschijnlijk mogelijk is zonder significant energieverlies.

Onnodig energieverlies is de rode draad in de bezwaren tegen de inzet van waterstof in de gebouwde omgeving. De deelnemers vanuit ECN menen op grond hiervan dat onderzoek naar een flexibele hythane infrastructuur moet worden afgewezen. Hun conclusie op de Integratie Workshop was dan ook dat op korte termijn waterstof eigenlijk alleen op zinvolle wijze kan worden ingezet in mobiele toepassingen.

Een andere lijn van argumentatie is naar voren gebracht door vertegenwoordigers van Gasunie. Kern van deze argumentatie is dat uit de onderzoeksagenda geen voorbarige conclusies mogen worden getrokken ten aanzien van de beleidsagenda. Onoverkomelijke problemen kunnen in de loop van het traject blijken; voor optimisme is voorsnog weinig aanleiding. Uit lopend onderzoek komen namelijk ook enkele nieuwe barrières naar voren. Het blijkt dat zelfs betrekkelijk geringe aanpassingen aan de kwaliteit van het gas al tot grote problemen en exorbitante kosten kunnen leiden. Er kan ook niet aan worden voorbij gegaan dat het (hoge druk) gasnet in toenemende mate ingezet zal worden voor internationaal gastransport dat aan regels is gebonden. De huidige nationale wet- en regelgeving staat een hythane infrastructuur in de weg. Daar komt bij dat het de vraag is of de leverancier en de transporteur hun verantwoordelijkheid voor de kwaliteit van het afgeleverde gas willen en kunnen dragen, omdat er in de voorziene situatie sprake is van schommelingen in de samenstelling van het gasmengsel.<sup>39</sup> De veiligheid is een groot punt van zorg. Hier is nog weinig over bekend. Bovendien geldt als bezwaar dat met name in de zomer, wanneer het gas nagenoeg stil staat, waterstoftekorten kunnen ontstaan. Het is zeer de vraag of concepten als 'dynamische opslag', flexibele waterstofproductieunits, waterstofbuffervoorraden, of verbreding van de Wobben-index dit probleem in voldoende mate kunnen adresseren. Tenslotte zouden de kosten wel eens erg hoog kunnen zijn.

Daarom tekenen de deelnemers aan de dialoog vanuit Gasunie aan dat implementatie niet kan worden gegarandeerd. Bovendien wordt aangevoerd dat, indien het onderzoek tot het politiek gewenste resultaat leidt, implementatie geruime tijd zal kosten, aangezien apparaten moeten worden aangepast. Het jaar 2022 is dus optimistisch. Het jaar 2030 lijkt een meer realistische optie. Overigens onderstreept deze visie de noodzaak om het onderzoek voor de Nederlandse infrastructuur op korte termijn ter hand te nemen. Maar het moet duidelijk zijn dat het hier een lange termijn perspectief betreft, waarbij succes

---

<sup>38</sup> Wij hebben het contact met May Britt Hägg kunnen leggen dankzij Onno Florisson (Gasunie), coördinator van het EU NaturalHY project.

<sup>39</sup> In dit verband is ook opgemerkt dat de monitoring en bemetering drastisch moeten worden geïnnoveerd.

niet is gegarandeerd. Ook wanneer zaken technisch mogelijk zijn kunnen de kosten een grote hindernis gaan vormen.

Het rapport van de Werkgroep Waterstof, getiteld Waterstof, brandstof voor Transitie, neemt een genuanceerd standpunt in ten aanzien van de mogelijkheden voor waterstof in de stationaire sector en in het bijzonder de bijmengoptie. Toch worden vooral bezwaren voorzien: Het hoge druk transportnet wordt in toenemende mate gebruikt voor internationaal gastransport. Het onttrekken van waterstof aan het mengsel, “hoewel technisch in principe wel mogelijk”, zal kostbaar zijn en tot rendementsverliezen leiden. Praktische complicaties zijn niet uit te sluiten, omdat de eindkwaliteit van het mengsel niet gegarandeerd kan worden. De Werkgroep Waterstof raadt ontmenging op grond van de nu bestaande inzichten dus af (p.7).

Vervolgens houdt het rapport wel een pleidooi voor de bijmengoptie in het lage druk gasnet “die in een overgangperiode op relatief korte termijn perspectief biedt voor het vergroenen van aardgas.” En het rapport vervolgt: “Een interessante gedachte in dit verband kan zijn om in een transitie naar waterstof als energiedrager de mogelijkheid te verkennen om in een vroegtijdig stadium een centrale transportinfrastructuur voor waterstof aan te leggen waar vanuit waterstof in de middendruk en/of lagedruk aardgasnetten kan worden gevoed op een constant niveau. Met geleidelijke aanpassing kan dit percentage in de loop der tijd stijgen, maar tegelijkertijd kunnen zich ook allerlei pure waterstoftoepassingen rond deze centrale productie ontwikkelen. Ook kan een dergelijke infrastructuur de ontwikkeling van een (klimaatneutraal) waterstofaanbod vereenvoudigen” (p.7). In de stationaire transitieroute wordt al in de periode 2010-2015 voorzien in het bijmengen van een vast percentage waterstof voor de bestaande bouw (p.12). Nieuwbouwwijken zullen direct een waterstofnet moeten krijgen. Voor het eindbeeld, zo stelt de Werkgroep, is er consensus over transport per pijpleiding, omdat er van wordt uitgegaan niet alleen voor mobiele maar ook voor grootschalige stationaire toepassingen zal worden gebruikt (p.13). Een centrale waterstofinfrastructuur is niet rendabel wanneer de waterstof alleen in voertuigen wordt toegepast.

De visie neergelegd in het rapport van de Werkgroep Waterstof uit oktober, 2006, vertoont sterke overeenkomsten met het tussenbeeld van de H<sub>2</sub> Dialoog in september 2006. Het realiseren van emissiereducties werd zowel in de werkgroep als in de dialooggroep als belangrijkste doel beschouwd. In de H<sub>2</sub> Dialoog is vervolgens het concept van een flexibele hythane infrastructuur uitgewerkt in reactie op de kritiek die toen breed leefde, niet in de laatste plaats bij leden van de Werkgroep Waterstof. In dit concept is bijmengen niet langer een middel tot louter emissiereductie, maar gericht op het transporteren van verschillende gassen naar eindgebruikers, waaronder groen aardgas en duurzame waterstof. Deze visie sluit aan bij de algemene verwachting dat er, zeker in de transitieperiode, verschillende (meer of minder duurzame) opties zullen concurreren.

Op het eerste gezicht kunnen de verschillen tussen H<sub>2</sub> Dialoog en de Werkgroep Waterstof groot lijken. Maar zij zijn misschien minder groot dan het lijkt. Wij kunnen vooral vaststellen dat de discussie niet is afgerond en dat een finaal oordeel in dit stadium beter achterwege kan blijven. Ondanks sterke bedenkingen wordt (voortzetting van) onder-

zoek naar van een flexibele infrastructuur in het rapport van de Werkgroep Waterstof niet afgeraden.<sup>40</sup>

### Overheidsbeleid en andere actoren

De innovatie van de energie-infrastructuur wordt gezien als een taak van de overheid. Maar in de onderzoeksfase zullen private partijen, met name bedrijven en kennisinstellingen het voortouw moeten nemen. Het ligt voor de hand dat partijen die nu al een voortrekkersrol spelen, met name Gasunie, deze rol blijven waarmaken. Omdat het hier om een majeure onderneming gaat met een enorme impact op de Nederlandse samenleving is het zaak om concurrerende alternatieven goed te vergelijken.

---

<sup>40</sup> Het rapport gaat ook in op de mogelijke inzet van waterstof als opslagmedium voor overtoollige duurzame elektriciteit. Dit wordt ontraden. Maar waterstof kan wel een rol spelen bij het stabiliseren van het elektriciteitsnet (p.5). Bij een maximale benutting van duurzame elektriciteit zal de overcapaciteit aan fossiele elektriciteit benut kan worden voor de productie van waterstof voor mobiele toepassingen.



## 5. Integrale visie

### Divergentie

De H<sub>2</sub> Dialoog heeft de mogelijke bijdrage verkend van waterstof aan de verduurzaming van de Nederlandse energievoorziening. Bij de opzet en organisatie van de dialoog hebben wij ons er rekenschap van gegeven dat over de verduurzaming van de energievoorziening in het algemeen en over de potenties van waterstof in het bijzonder veel onzekerheden en verschillen van inzicht bestaan. Wij hebben het dialoogproces zo trachten te organiseren dat verschillen van inzicht werden beargumenteerd zodat reflectie op deze inzichten mogelijk wordt, ook voor relatieve buitenstaanders en leken. In de dialoog zijn verschillende, mogelijk concurrerende, waterstoftrajecten in drie dialooggroepen ontwikkeld. Er zijn niet alleen voorstanders van waterstof maar ook sceptici bij de dialoog betrokken. In de discussie, zoals bij de back-casting exercities, is waar mogelijk aandacht besteed aan een niet-waterstof referentiebeeld. De dialooggroepen hebben elkaar wederzijds bevraagd en bekritiseerd. Het resultaat levert, zoals wij konden verwachten, een divergent beeld.

De bevindingen van de dialooggroepen zijn gebaseerd op verschillende visies met betrekking tot de wenselijke ontwikkeling van de energievoorziening en de rol van waterstof hierbij. Enerzijds pleiten sommigen voor een decentrale energievoorziening die lokaal is georganiseerd. Anderen hebben juist alle vertrouwen in het huidige systeem van energieopwekking en levering en staan wantrouwend tegenover autarkische experimenten. Daarnaast is er verschil van inzicht over de rol van waterstof in de transitie. Sommigen hebben hoge verwachtingen van de ontwikkeling naar een waterstofeconomie, anderen zien de inbreng van waterstof als beperkt. Velen achten de doorbraak van waterstof aanvankelijk vooral kansrijk in de transportsector. Anderen zien op korte termijn ook al grote kansen in een doorbraak van waterstof in de gebouwde omgeving.

Deze visies zijn op zichzelf geenszins nieuw. Wel nieuw is dat zij in de H<sub>2</sub> dialoog helder voor het voetlicht zijn gebracht. In de dialoog hebben, met alle beperkingen en onvolkomenheden die in de procesevaluatie nader aan de orde zullen komen, experts en andere betrokkenen argumenten gewisseld over de voors en tegens van centrale en decentrale opwekking en van waterstof en niet waterstof alternatieven. Dit is bijzonder, omdat in het algemeen in Nederland de discussies worden gevoerd binnen een beperkt netwerk waarin participanten hetzelfde paradigma hanteren. Er is een begin van interactie tot stand gebracht tussen personen uit in Nederland betrekkelijk gescheiden opererende netwerken, zoals het waterstofnetwerk, het klimaatnetwerk, het vergroenen van gas netwerk en anderen.

### De maatschappelijke context als integrerend kader

In dit rapport worden de resultaten uit de H<sub>2</sub> Dialoog, routes naar een verduurzaming van de Nederlandse energievoorziening, geplaatst in de context van het klimaatprobleem, stedelijke luchtkwaliteit en een drietal andere maatschappelijke vraagstukken, te weten de voorzieningszekerheid, de leveringszekerheid en de keuzevrijheid voor de afnemers. De keuze voor deze context is ingegeven door overwegingen van maatschappelijke relevantie. Verduurza-



ming van de energievoorziening draagt ten eerste bij aan het realiseren van grote opgaven ten aanzien van de reductie van broeikasgasemissies en de vermindering van luchtvervuiling in de steden (fijn stof, NO<sub>x</sub>, etc.). Tegelijkertijd wordt de afhankelijkheid van importen uit potentieel instabiele regio's verminderd, hetgeen bijdraagt aan de voorzieningszekerheid. Dit veronderstelt een verandering van de energiemix en een diversificatie van energiedragers. Het garanderen van leveringszekerheid wordt belangrijker naarmate de effecten van klimaatverandering, in de vorm van extreme weersomstandigheden, zich (zullen) doen voelen. Diversificatie van energiedragers, goed vanuit de optiek van voorzieningszekerheid, leidt niet vanzelfsprekend tot een betere leveringszekerheid. Voorwaarde is een duurzame energie infrastructuur. Dit is een infrastructuur die enerzijds bestand is tegen de impacts van klimaatverandering, anderzijds in staat is om afnemers te voorzien van duurzame energie.

De routes, die de dialooggroepen hebben geïdentificeerd, leveren afzonderlijk maar vooral gezamenlijk een bijdrage aan de aanpak van het klimaatprobleem, de voorzieningszekerheid, de leveringszekerheid en de stedelijke luchtverontreiniging.

Keuzevrijheid van afnemers is een problematiek van een ietwat andere orde. Deze sluit aan bij de heersende trend, liberalisering van de energiemarkt. Het draagvlak voor verduurzaming zal kunnen afnemen wanneer energiegebruikers worden geconfronteerd met monopolies in een tijd dat alom de mogelijkheden worden gestimuleerd om desgewenst van energieleverancier te wisselen. Verduurzaming maakt van bewuste consumenten en bedrijven in toenemende mate ook energieproducenten die zich begeven op een markt van opties voor besparing en opwekking. Keuzevrijheid zal in de toekomst niet meer beperkt blijven tot de keuze van energieleverancier. In geval van collectieve opties op lokaal niveau, zoals stadsverwarming, Zonneterp of Stoere Houtman (achtige) concepten, kunnen bewoners, energiebedrijven en (lokale) overheden in coproductie institutionele oplossingen ontwikkelen. Dit geldt ook voor bedrijvensclusters. Op veel plaatsen zal dit waarschijnlijk lastiger zijn en ligt het in de rede om routes te kiezen die afnemers, zeker in een transitiefase, de vrijheid geven bij het kiezen van opties en het moment waarop zij hiertoe overgaan.

Geredeneerd vanuit het perspectief van het transitie management en de politieke aansturing van de transitie komt het er dus op neer maatregelen zo te kiezen dat in de praktijk alternatieve duurzame opties beschikbaar zijn. Dit is belangrijk voor huishoudens en individuele consumenten, maar het is minstens zo belangrijk voor bedrijven. De dialooggroepen hebben elk op een eigen wijze invulling gegeven aan dit eigentijdse idee. In de hoofdroutes decentraal duurzaam, transport en infrastructuur wordt aandacht besteed aan de beschikbaarheid van alternatieven.

De context die in dit rapport is gekozen leidt tot een zekere synergie tussen de conflicterende visies. Vooral de noodzaak om de klimaatproblematiek aan te pakken heeft repercussies in de zin dat er een zekere synthese noodzakelijk wordt tussen conflicterende posities. Immers, om de CO<sub>2</sub>-problematiek aan te pakken zal zowel op centraal als decentraal niveau een weg moeten worden ingeslagen die op den duur leidt tot het uitfasen van fossiele brandstoffen. Uit de dialoog komt naar voren dat er verschillende wegen naar Rome leiden. Er zijn, dan wel komen duurzame trajecten beschikbaar met en zonder waterstof. Een zogenaamde lock-in

moet worden vermeden. Wat de dialoog aan het licht brengt is, op metaniveau, de noodzaak om een kader te scheppen waarbinnen voor concurrerende trajecten een plek is in de markt.

### Emissiereducties via systeemveranderingen

In Tabel 5.1 zijn de bevindingen ten aanzien van de reductie van broeikasgassen samengevat. Hierbij is ook een indicatie gegeven van de termijn waarop resultaat te verwachten valt van deze routes, of van opties binnen deze routes. Volgens onze berekening zullen de routes gezamenlijk over 15 jaar, dus in 2022, kunnen leiden tot een emissiereductie van circa 60 Mton. Dit is circa 15% ten opzichte van de 200 Mton CO<sub>2</sub>-equivalenten voor Nederland in 1990.<sup>41</sup> Van de 60 Mton wordt ruim 40% behaald met behulp van het doorbreken van decentraal duurzame concepten, voornamelijk in de gebouwde omgeving. De transportsector kan ruim 35% bijdragen, terwijl de overgang naar een flexibele Hythane infrastructuur een aandeel heeft van circa 20%.

Hoe kan dit resultaat beoordeeld worden tegen de achtergrond van het Nederlandse en Europese klimaatbeleid? In Europees verband heeft de Commissie een ambitieuze aanzet gegeven voor een New European Energy Policy, waarover tijdens de European Council van maart politieke conclusies te verwachten zijn met betrekking tot de uitstoot van broeikasgassen en de rol van duurzame energie. De inzet daarbij is gericht op reducties in de orde van 20 tot 30% in 2020 en een aandeel duurzaam eveneens van 20%. Het Nederlandse beleid is nog ambitieuzer. Het regeerakkoord stelt als doel 30% reductie van uitstoot in 2020, ten opzichte van 1990. Dit zou onder meer gerealiseerd moeten worden door middel van een jaarlijkse energiebesparing van 2% en een aandeel van 20% duurzame energie in 2020.

Wij moeten in aanmerking nemen dat de H<sub>2</sub> Dialoog lang niet alle mogelijkheden heeft onderzocht. Opties als stadsverwarming, aanpassingen in de landbouw, CO<sub>2</sub> opslag, groot-schalige inzet van wind e.d. kunnen nog voor veel reducties zorgen. Wanneer bovendien in aanmerking wordt genomen dat er misschien nog veel te halen is met reducties in het buitenland en bij niet CO<sub>2</sub> broeikasgassen, kan een positief beeld ontstaan.

Er is evenwel ook een minder positieve evaluatie mogelijk. Om de ambitieuze doelstellingen te halen zouden wel alle drie trajecten uit de H<sub>2</sub> Dialoog in gang gezet moeten worden en ook nog binnen de gestelde tijd tot positief resultaat moeten leiden. Het is evenwel duidelijk dat alle routes die vanuit de dialoog worden gesuggereerd te kampen hebben met weerstanden van technische, politieke en economische aard. De politieke wil om het Nederlandse aandeel in de mondiale klimaatverandering een halt toe te roepen is nog onvoldoende gepaard aan het

---

<sup>41</sup> Inclusief de inzet van de tot op heden (2005) bekende beleidsinstrumenten prognosticeren het MNP en ECN afhankelijk van de gekozen basisscenario's (een Strong Europe versus een Global Economy) voor 2020 CO<sub>2</sub>-emissies van resp. 240 en 218,5 Mton. (Referentieramingen energie en emissies 2005-2020, pp. 192, 193). Het beleidstekort ten opzichte van het door de regering nagestreefde niveau van 140 Mton in 2020 zal dan resp. 100 en 78,5 Mton zijn. Dat moet worden overbrugd met andere maatregelen. Het maatregelenpakket dat in dit rapport wordt voorgesteld kan, afhankelijk van het gekozen scenario 59% dan wel 75% van het CO<sub>2</sub>-reductietekort overbruggen.

besef dat systeemveranderingen nodig zijn om het gebruik van fossiele brandstoffen daadwerkelijk los te laten.

*Tabel 5.1 Klimaatwinst bij routes met en zonder waterstof in 2022.*

Route	Penetratie	CO <sub>2</sub> -reductie (Mton)	CO <sub>2</sub> -reductie als percentage reductie-potentieel / 2022	Vanaf
<i>Decentraal duurzaam</i>		24,5	41,8%	<i>Heden</i>
Zonder H <sub>2</sub> :				
- Kassen	100%	18,5	31,6%	Heden
- Gebouwen	17%			2010
Met H <sub>2</sub> : De Stoere Houtman	10%	6	10,2%	2012
<i>Transport</i>		22,2	37,9%	<i>Heden</i>
Bijmengen tot 20%	40%	5,3	9,0%	Heden
Biobrandstoffen	30%	9,3	15,9%	2009
Gas, Gas / H <sub>2</sub> -mengsels	10%	3,2	5,5%	2010
H <sub>2</sub> -brandstofcel (uit groene waterstof)	10%	4,4	7,5%	2016
H <sub>2</sub> -brandstofcel (zonder CCS)	10%	(2,4) <sup>42</sup>	(4,1%)	2016
<i>H<sub>2</sub> in integrale infrastructuur</i>		11,9	20,3%	<i>Heden</i>
Hythane infra (CO <sub>2</sub> -neutraal)	100%	7	12,0%	2020
Micro-wkk (op aardgas)	40%	2,6	4,4%	2012
Micro-wkk /H <sub>2</sub>	--	--	--	2012
H <sub>2</sub> -productie / CO <sub>2</sub> -opslag	--	--	--	?
H <sub>2</sub> -productie elektrolyse	100%	2,3	3,9%	2022
<b>TOTAAL</b>		<b>58,6</b>	<b>100%</b>	<b>in 2022</b>

Wanneer wij de cijfermatige doelstellingen voor 2020 laten voor wat zij zijn dan kan een derde conclusie worden getrokken, namelijk dat de trajecten uit de dialoog, wanneer zij eenmaal lopen, voor de lange termijn een onomkeerbaar proces van emissiereductie op gang zullen brengen. Dit komt doordat de trajecten meer zijn dan technologische opties. Zij behelzen systeemveranderingen die zelf weer tot nieuwe innovaties aanleiding zullen geven. Wij doelen met name op vier systeemveranderingen. Dit zijn:

- *De Kas als energiebron / Zonneterp concept.* Deze niet waterstofvariant van het traject decentraal duurzaam wordt hier het eerst genoemd, omdat er al op redelijk korte termijn belangrijke resultaten mee kunnen worden geboekt. Wel zal nog onderzoek moeten worden gedaan naar de technische uitwerking van de Zonneterp. Er is een financiële bijdrage van de overheid nodig om dit traject snel te commercialiseren. De Zonneterp zal leiden tot 100% verduurzaming van de energiehuishouding tegen, zo verwachten de direct betrokkenen, relatief lagere kosten (of zelfs opbrengsten) per vermeden ton CO<sub>2</sub>. Ook zul-

<sup>42</sup> Het reductiepotentieel van H<sub>2</sub>-brandstofcel met waterstof uit aardgas en uit groene methanol mogen niet bij elkaar worden opgeteld omdat dat dan uitgekomen wordt boven de maximale penetratiegraad van 10%.

len regels moeten worden herzien om het traject juridische mogelijk te maken. Het concept veronderstelt bovendien een nieuwe beleidsvisie op de ruimtelijke inpassing van de glastuinbouw. Met name het Zonneterp concept is ook interessant voor ontwikkelingslanden en industrialiserende landen met grote kolenvoorraden;

- *De Stoere Houtman.* Deze waterstofvariant van het traject decentraal duurzaam zal wat meer tijd vergen voor commercialisering. Het belang van het concept is dat, in plaats van opties geïsoleerd te implementeren, er voor een woning of buurt in overleg tussen bewoners en (energie)bedrijven een geïntegreerd concept wordt ontwikkeld. Dit concept zal geïmplementeerd kunnen worden in een samenwerkingsverband van bewoners, innovatieve bedrijven, projectontwikkelaar(s), de gemeente en een energiebedrijf. Onderzocht zal moeten worden hoe dit concept geïmplementeerd kan worden en tegen welke kosten. Ook bij dit concept spelen opties een rol die interessant zijn voor duurzame ontwikkelingssamenwerking;
- *Het waterstof brandstofcel voertuig* zal naar verwachting rond 2015 commercieel worden geïntroduceerd. In 2022 zal de penetratie van deze technologie derhalve nog relatief bescheiden zijn, maar deze zal naderhand steeds verder kunnen toenemen. Het voertuig is een potentiële energieproducent. Een koppeling tussen de stationaire en de mobiele sector is eventueel op termijn denkbaar. Er zullen overheidsinvesteringen nodig zijn om Nederland een rol te laten spelen in de internationale ontwikkeling. De overheid zal als launching costumer moeten optreden, bijvoorbeeld in geval van het eigen wagenpark of van stadsbussen. Productie van (groene) waterstof uit (bio)methanol, kan ook voor ontwikkelingslanden interessant zijn, gezien het lokale potentieel voor de productie van (groene) methanol;
- *De geïntegreerde en flexibele energie infrastructuur.* Dit traject is voor Nederland een uitdagende onderzoeks optie. In het kader van de verduurzaming van de energievoorziening is dit traject als ambitie wellicht beslissend. Niet alleen consumenten maar ook bedrijven hebben baat bij een energie-infrastructuur die ruimte biedt aan verschillende duurzame opties. De overheid zal wel moeten investeren in onderzoek naar technologieën voor menging en scheiding van gassen (waaronder CCS) en vergroening van gas, waaronder de productie van waterstof.

In alle hier behandelde concepten voor systeemverandering speelt brandstofceltechnologie een beslissende rol. De Nederlandse overheid zou er goed aan doen om, in overleg met private partijen en onderzoeksinstituten te komen tot een nationaal Centrum voor brandstofceltechnologie dat zich richt op het ondersteunen van de ontwikkeling en commercialisering van brandstofcellen. Het is hierbij van belang dat grote en kleine bedrijven samenwerken en dat nieuwkomers een kans krijgen.

In principe zijn de meest omvangrijke resultaten te behalen bij niet-fossiele oplossingen. Dit is eigenlijk logisch, want uiteindelijk gaat het om het uitbannen van fossiel uit de energievoorziening. Fossiele opties bieden alleen soelaas in combinatie met CO<sub>2</sub>-opslag of scheidingstechnieken waarbij uitstoot van CO<sub>2</sub> zoveel mogelijk wordt vermeden. Tegelijkertijd hebben de concepten voor systeemverandering positieve effecten op de voorzieningszeker-

heid en de leveringszekerheid en bieden zij alternatieven die voor afnemers. Met name het traject waterstofauto met brandstofcel levert een grote bijdrage aan de lokale luchtkwaliteit.

### De rol van waterstof

Wat valt er op basis van de bevindingen van de drie dialooggroepen te zeggen over de bijdrage van waterstof aan de overgang naar een duurzaam energie systeem voor Nederland? Het blijkt dat waterstof op drie manieren een cruciale rol speelt.

Ten eerste zal waterstof van belang zijn voor de mobiele sector. Hier valt immers de grootste efficiency winst te behalen. Het perspectief om al snel groene waterstof te produceren kan de penetratie van waterstof brandstofcelvoertuigen alleen maar versnellen.

Ten tweede is waterstof een belangrijke kandidaat om overtollige elektriciteit, onder meer uit duurzame bronnen, te bufferen en hieruit al naargelang de vraag elektriciteit en warmte te produceren. Bij overtollige elektriciteit denken wij aan decentraal, maar ook centraal geproduceerde elektriciteit. Waterstof levert hiermee een mogelijk interessante bijdrage aan het tegengaan van de kwetsbaarheid van de energie-infrastructuur in Nederland.

Waterstof is niet de enige kandidaat om elektriciteit te bufferen. Wordt de gewonnen waterstof ingezet voor de productie van elektriciteit en warmte met behulp van brandstofcellen (wkk, mini- en micro-wkk) dan kan waterstof als buffer te verkiezen zijn boven alternatieven. In de praktijk zal moeten worden uitgetoetst of elektrolyse van overtollige stroom een preferente optie is en of de kosten acceptabel zijn. Alternatieven voor buffering (als stuwmeren en hoge luchtdrukopslag, vliegwielen en accu's) moeten niet worden uitgesloten maar zij moeten wel over de hele keten en op hetzelfde schaalniveau gezien beter scoren op de criteria klimaatreducties, stedelijke luchtkwaliteit, voorzieningszekerheid, leveringszekerheid en keuze vrijheid afnemers.

Ten derde is waterstof een optie in het vergroenen van gas. In Nederland zal grootschalige waterstof productie ten behoeve van bijmengen in het gasnet vermoedelijk uit aardgas (CH<sub>4</sub>) plaatsvinden. Ook bij het afvangen en de ondergrondse opslag van CO<sub>2</sub> kan waterstof worden geproduceerd, afhankelijk van de methode die voor het afvangen van CO<sub>2</sub> wordt gebruikt. Het benutten van de koolstof bij CO<sub>2</sub>-vrije waterstofproductie is een urgent vraagstuk voor de onderzoeksagenda.

De bijdrage van waterstof mag minder groot lijken dan in een aantal visies op 'de waterstof economie' wordt verondersteld, maar zij is hiermee niet minder belangrijk. De waterstof opties volgen in de tijd de niet-waterstof opties, maar zij zullen naar verwachting in de tijd aan belang winnen. Daarom is het zo belangrijk voor Nederland dat er een infrastructuur komt die ruimte biedt aan zowel waterstof als (groene) methaan. Verschillende gassen hebben een belangrijke rol te spelen in de transitie naar een duurzame energievoorziening. Waterstof kan een cruciale rol spelen, zelfs als de brandstofcel waterstofauto de hooggespannen verwachtingen niet mocht waarmaken. Het is dan ook onjuist om een oordeel over waterstof en brandstofceltechnologie louter te baseren op een verwachting met betrekking tot de doorbraak van waterstof in de mobiele sector. Daarom is in de dialoog en in dit rapport waterstof in een bredere context geplaatst.

## Literatuur

- Beld, L. van de, Bouwmans, I., Claassen, P.A.M., Hemmes, K., Wit, H. de, Woudstra, N., Woudstra, Th. & Zachariah, J.L. (2003). *Exploring new production methods of hydrogen/natural gas network of the Netherlands*. Paper presented at ECOS 2003, Copenhagen, Denmark, June, 30 - July, 2, Vol. I: 55-62.
- Bossel, U., Eliasson, B. & Taylor, G. (2003). The future of the Hydrogen economy: bright or bleak? *Cogeneration and Distributed Generation Journal*, 18(3), 29-70.
- Brandes, L.J. et al. (2006). *Greenhouse Gas Emissions in the Netherlands 1990 - 2004. National Inventory Report 2007*. MNP, Bilthoven.
- CEB - Commissie Energie en Buitenlands Beleid (2006). *Energiek Buitenlands Beleid: Energievoorzieningszekerheid als nieuwe hoofddoelstelling*. Algemene Energieraad en Adviesraad Internationale Vraagstukken, Den Haag.
- Committee on Alternatives and Strategies for Future Hydrogen Production and Use, National Research Council and National Academy of Engineering (2004). *The Hydrogen Economy: Opportunities, Costs, Barriers, and R&D Needs*. Washington DC: The National Academies Press.
- Dril, A.W.N van & Elzenga, H.E. (red.) (2005). *Referentieramingen energie en emissies (2005 - 2020)*. ECN en RIVM, Petten.
- Fransella, F., Bell, R. & Bannister, D. (2004). *A manual for repertory grid technique*. Second edition. Sussex: John Wiley & Sons, Ltd.
- Hägg, M.B. & Quinn, R. (2006). Polymeric facilitated-transport membranes for hydrogen purification. *MRS Bulletin*, 31, 1-6.
- Houweling, H. & Amineh, M.P. (2003). The crisis in IR-Theory: Towards a Critical Geopolitics Approach. *Perspectives on global development and technology*, 2/3, 339-389.
- Kampman, B.E., Boer, L.C. den & Croezen, H.J. (2005). *Biofuels under development, An analysis of currently available and future biofuels, and a comparison with biomass application in other sectors*. CE, Delft.
- Kelly, G. (1955). *The psychology of personal constructs. Volume one – A theory of personality*. New York: W.W. Norton.
- Kerkhof, M. van de, Stam, T., Bode, R. & Hisschemöller, M. (2005a). *Verslag van de oriënterende interviews met waterstof stakeholders. Werkdocument 1 H<sub>2</sub> Dialoog*. IVM rapport (W-05/11). Instituut voor Milieuvraagstukken, Vrije Universiteit Amsterdam.
- Kerkhof, M. van de, Bode, R., Cuppen, E., Hisschemöller, M., Stam, T. & Varol, I. (2005b). *Verslag van de Scoping Workshop van de H<sub>2</sub> Dialoog. Werkdocument 2 H<sub>2</sub> Dialoog*. IVM rapport (W-05/15). Instituut voor Milieuvraagstukken, Vrije Universiteit Amsterdam.
- Kingma, D. & Suyker, W. (2005). *Memorandum. Veel gestelde vragen over olie en de wereldeconomie*. CPB memorandum, Centraal Planbureau, Den Haag.
- Lie, J.A. & Hägg, M.B. (2005). Carbon membranes from cellulose and methal loaded cellulose. *Carbon*, 43, 2600-2607.
- Menkveld, M. (red.) (2004). *Energietechnologieën in relatie tot transitiebeleid – Factsheets*. ECN, Petten.
- Muradov, N. & Veziroglu, T.N. (2005). From hydrocarbon to hydrogen-carbon to hydrogen economy. *International Journal of Hydrogen Energy*, 30, 225-237.

- Oei, P. et al. (2006). *Een kas voor elke woonwijk. Duurzame energie voor de gebouwde omgeving uit deglastuinbouw*. Innovatienetwerk en Stichting Innovatie Glastuinbouw, Utrecht.
- Stam, T. (2006). *Energiestromen uit zon in Duurzaam Decentraal*. Interne notitie ten behoeve van bijeenkomst groep 3 van de H<sub>2</sub> Dialoog. Instituut voor Milieuvraagstukken, Vrije Universiteit Amsterdam.
- Werkgroep Waterstof (2006). *Waterstof Brandstof voor Transitie*. Ministerie van Economische Zaken, Den Haag.
- Wit, H. de, Hemmes, K., Barten, H. & Zachariah, J.L. (2007). *Chances & potential limitations of mixing hydrogen to natural gas: The greening of natural gas in the Netherlands*. Paper presented at the World Hydrogen Technologies Convention, November, 4-7, Montecatini - Italy.

## **Bijlage 1. Resultaten rekenmodel voor CO<sub>2</sub>-reductie**





### Resultaten rekenmodel voor CO<sub>2</sub>-reductie

CO <sub>2</sub> -reducties	Veronderstelde/gewenste	Reductie in Mton		als % uitstoot	als % totale
Route in 2022	penetratiegraad	bij 100% inzet	reductie in Mton	eigen sector	uitstoot Ned
<b>Geb. Omgeving</b>					
Kas als energiebron (zonneterp concept)	100,0%	18,5	18,5	36,9%	8,0%
PV op daken (SC-panelen)	50,0%	32,0	16,0	26,7%	7,0%
PV op daken (folie)	50,0%	72,0	36,0	60,0%	15,7%
Concept De Stoere Houtman (incl. H <sub>2</sub> -buffer)	10,0%	30,0	3,0	11,1%	1,3%
<b>Totaal duurzaam</b>					
<b>Mobiliteit</b>					
Biobrandstoffen	30,0%	30,9	9,3	21,0%	4,0%
bijmengen 20% biobrandstoffen	40,0%	13,3	5,3	12,0%	2,3%
Elektrische voertuigen	0,1%	-26,5	0,0	-0,1%	0,0%
Aardgas CO <sub>2</sub> -vrije H <sub>2</sub> -mengsels	10,0%	31,8	3,2	7,2%	1,4%
H <sub>2</sub> / FC; H <sub>2</sub> -productie via groene methanol	10,0%	44,0	4,4		2,3%
H <sub>2</sub> / FC; H <sub>2</sub> -productie via SMR zonder CO <sub>2</sub> -opslag	10,0%	24,3	2,4	5,5%	1,1%
<b>Totaal mobiliteitsopties</b>	100,1%		25,6	57,9%	11,1%
<b>Infra</b>					
Vergroening van gas (plantaardig gas)	100,0%	49,6	49,6	70,0%	21,5%
Integrale Hythane Infra	100,0%	-4,4	-4,4	-6,3%	-1,9%
100% H <sub>2</sub> -infrastructuur	100,0%	-17,7	-17,7	-25,0%	-7,7%
<b>Totaal infra</b>					
<b>Infra deeloplossingen</b>					
Decentrale e-prod. uit H <sub>2</sub> /aardgas + CCS t.b.v. de geb. omg.	10,0%	20,0	2,0	10,0%	0,9%
H <sub>2</sub> uit electrolyse / overschotten wind	100,0%	2,1	2,1	10,4%	0,9%
Grootschalige woningisolatie	40,0%	21,0	8,4	14,0%	3,7%
CO <sub>2</sub> -afvang en opslag	50,0%	99,0	49,5	50,0%	21,5%
Micro-wkk (op aardgas)	40,0%	6,5	2,6	20,0%	1,1%

**THEMA CO2 EMISSIES**

CO <sub>2</sub> eq Ned in Megaton in 1990	200	1990
Doelreductie in 2020 tov 1990 (EU)	20%	2020
Benodigde reductie per jaar	5.4	
Benodigde emissie in tussenjaar	149.2	2022
Emissie bij ongewijzigd beleid ogv econ groei	333.1	2022
Emissie bij efficiency doel van 2% plus ongewijzigd beleid	247.9	2022
CO <sub>2</sub> -reductietekort bij 2% grotere energie efficiency	98.6	2022
CO <sub>2</sub> eq Ned in Mton in 2005	230	Mton
Uitstoot uit aardgas in Nederland	70.8	Mton
Uitstoot voor en van verkeer	44.2	Mton
Uitstoot industrie en energie	55	Mton
Uitstoot centrale E opwekking	20	Mton
Uitstoot electr. centrales tbv huishoudens	13	Mton
Langcyclisch CO <sub>2</sub> uit biobrandstoffen/conventioneel	30.0%	
CO <sub>2</sub> -inhoud gas/conventioneel ICE	80%	
CO <sub>2</sub> -inhoud hythane/aardgas	90%	
CO <sub>2</sub> -uitstoot raffinage voor verkeer	8.2	Mton
kgCO <sub>2</sub> per m3 aardgas	1.77	kg
CO <sub>2</sub> -uistoot E voor woningen	27.054	mton
CO <sub>2</sub> -uitstoot E voor gebouwen	60	mton
CO <sub>2</sub> -uitstoot van verkeer	36	Mton
CO <sub>2</sub> -uitstoot wonen plus kassen	50.054	Mton
prijs CO <sub>2</sub> /ton	7	euro
CO <sub>2</sub> -uitstoot kassen	23	Mton
CO <sub>2</sub> -uitstoot wonen plus particulier vervoer	51	Mton

incl. CO<sub>2</sub> uit raffinage

check

MNP

bron: CE

Muradov

eigen berekening

Ecofys: Kosteneffectieve\_energiebesparing\_en\_klimaatbescherming, Sep2005.pdf

MNP, 2006

MNP

**THEMA WONEN**

aantal woningen	6000000		
CO <sub>2</sub> /KWe woning	0.5	kg	
Gem gasverbruik per woning pj	1700	m3	Overdiep
Gem E verbruik per woning pj	3000	Kwh	Overdiep
Cons prijs per m3 aardgas	0.57		jaarnota
Technische levensduur isolatiemaatregelen	20	jaar	
Cons prijs per Kwh E	0.17		jaarnota
Totaal dakoppervlak Nederland			
reductiegasverbruikpdoor isolatie	35%		Ecofys: Kosteneffectieve_energiebesparing_en_klimaatbescherming, Sep2005.pdf
isolatiekstper woning gem.	5000		<a href="http://www.energielastenverlager.nl">www.energielastenverlager.nl</a>
nettoextrainvperhuisStoereH	32000		bron: H.Hof, spreadsheet
onderhoudkstppwStoereH	-192		bron: H.Hof, spreadsheet
reductie KWhppwStoere	3,933	Kwh	bron Hof, maar genormaliseerd naar Ned. Gemiddeld elctra gebruik
Reductiegasm3ppwStoere	1712	m3	bron Hof, maar genormaliseerd naar Ned. Gemiddeld gasgebruik

**THEMA VERVOER**

verreden km personenvervoer pj	1.5E+11		
verreden km vracht	60000000000		
km luchtvervoer			
well-to-wheel efficiency convICE/FCV	1.333333333		
tank-to-wheel efficiency convICE/FCV	2		
gem prijs vrachtauto	100000		
prijsEV/conventioneel voertuig	1.4		<a href="http://www.emis.vito.be/mobiliteit/index.asp?pageChoice=Elektrischmotor&amp;Bc=Brandstoffen">http://www.emis.vito.be/mobiliteit/index.asp?pageChoice=Elektrischmotor&amp;Bc=Brandstoffen</a>
Technische levensduur voertug	8		
co2reductiegasinautotovbenzine	20%		Hofmeijer, VROM
jaarkmpersonenautogem	30000		
jaarkmvrachtautogem	60000		
verlies batterijen pj	35%		
ttweffEV/huidige voertuigen	5.0		
totaal aantal personenautos	5000000		
totaal aantal vrachtautos	1000000		
gem prijs personenauto	15000		

WtweffFCV/convICE			ECN: Inventarisatie milieupotentieel brandstofcelvoertuigen vor het Nederlandse wegverkeer. ECN CO1-100.
ttweffFCV/huidige voertuigen	1.75		ECN: Inventarisatie milieupotentieel brandstofcelvoertuigen vor het Nederlandse wegverkeer. ECN CO1-100, blz 29
co2uitstootFC/convICE (WTW)	0.45		ECN: Inventarisatie milieupotentieel brandstofcelvoertuigen vor het Nederlandse wegverkeer. ECN CO1-100., blz 35.

**THEMA STAAT**

gemiddelde bijdrage O aan investeringskosten	40%		eigen schatting
gem. aandeel Overheid in gasprijs	65%		Eigen schatting
gem. aandeel Overheid in E-prijs	68.0%	(REB +BTW+?)	zie jaarnota
gem. staatsdeel in benzineprijs			
gem. staatsdeel in autoprijs	44%		

**THEMA KASSEN (zonneterp)**

CO2 emissie glastuinbouwsector pj/ned totaal	10%		Van Andel
E-teruglevercapaciteit kas per m3			
gasopbrengst per m2 kas zonneterp	105	m3	Van Andel
inv kosten zonneterp p. woning	3000.00	euro	Van Andel mail dd 1-3-2007
centrale inv per 200 woningen	4667520.93		
Techn. Levenduur zonneterpapparatuur	10.00	jaar	
huidig gasverbruik kassen per m3			
totaal hoeveelheid kassen in m2	100000000	m2	Van Andel
exploitatievoordeel per 200 woningen pj	1,289,453		
m3kasperwoningNed	16.67		
m2kaspwoninginzonneterp	100	de zonneterpwebsite	

maxpenetratiezonneterp	16.67%	van de woningen
gem.nutslasten pj pwoning	1300	riolering en water en afvalheffing
Gabesparing phuis ikvzonneterp	13276.83616	berekening ogv website zonneterp
co2reductie pwoning pj ikv zonneterp	18.46	ton
reductie op energierekening door zonneterp per woning	25%	

Van Andel datasheet

Van Andel

#### THEMA PV

1stuurunitfolie	1300	
installkstfoliepw	1500	
prijs PV folie per m3	40	euro
kosten Pvpanelen per woning	3700	euro
techn levensduur folie en panelen	30	jaar
onderhoud PVper woning pj	50	
jaarpbrengst Pvpanelen per woning	1600	Kwh
gem dakoppervlak	30	m3
jaarpbrengst dakPV/m3 in Kwh	120	Kwh

gelijk a. PV

eigen schatting

bron Van Andel

Menkveld. 8 panelen en 1 stuurunit.

ECN : Factsheets energietechnologieen

Menkveld

Menkveld

Stam

Holland Solar, Transitiepad zonnestroom, mei 2005

#### THEMA WATERSTOF

energie efficiency grootsch. SMR	0.8	
energieeff electrolyse grootsch.	0.8	
techn. Levensduur reformer en electrolyser	15	jaar
energieinhoudwaterstof/aardgasperm3	0.3	
invkstelectrolyser/Kwe	500	
onderhoudskst electrolysers/invkst	2%	
Waterstofinm3uitEinKwh	0.78	

[www.hydrogen.energy.gov/docs/cs\\_central\\_wind.doc](http://www.hydrogen.energy.gov/docs/cs_central_wind.doc)

eigen schatting

HyWeb Hydrogen fact sheet

#### THEMA ELECTRICITEIT

draaiuren pj Ecentrale	6500	uur
invkstcentraleEpKWe (STEG)	500	checken
geïnstalleerde centrale E capaciteit	20000000000	Kw

CE: Welke nieuwe electriciteitscentrale in Nederland, juni 2005, blz 24

E\_data Kas Hemmes

energieeff energiecentrales	45%	(incl.transportverliezen)	
jaarconsE Ned	12683916.79	Kw	E_data Kas Hemmes
transportkstEpkwh	0.000001		check
invkstFCstat2020/Kwe	1300	euro	Rastler,D. 2005. Status, Trends and Market Forecast for Stationary Fuel Cell Power Systems. Ohio Fuel Cell Symposium May 11, 2005 gdonload via: <a href="http://www.fuelcellsohio.org/images/02_Rastler-EPRI.pdf">http://www.fuelcellsohio.org/images/02_Rastler-EPRI.pdf</a> . Laatst bekeken op 8 november 2005.
effvoordeelstatFC/convEcentrale	1.333333333		
Eprijsperkm/benzineprijsperkm	0.8		
niet inpasbare wind E in 2020	5000	MWh	Tennet
KW/m3aardgas	10		Ludwg-Bolkow System Technik GmbH
CO2/Gj	167	kg	N. Beuvery. Toepassing van^stationaire Brandstofcellen in Nederland. NWS-I-2005-26, Copernicus Institute for Sustainable Development and Innovation. Department of Science Technology and Society Utrecht University
J/W	3600		E_data Kas Hemmes

#### THEMA GASINFRA

Hythanenorm	25%	waterstof	
km aardgasnet	11000		Gasunie
Aanlegkosten waterstof of gasnet per m	500		De Wit
techn. Levensduur gasnet	40	jaar	
kosten aanpassing hynet per km			
jaarlijks verbruik aardgas	40	megaton	
kstaanpgasnetahythane/waterstofnet	10%		eigen schatting

**THEMA MICRO-WKK**

effic microwkk:centrale opwekking	2.0		
techn. Levensduur HRE	10.0		
meerprijs 1 microwkk	5000		Overdiep
gem opbrengst pj 1 mikrowkk installatie	1000		Overdiep

**THEMA CCS**

CCSkosten per ton	60	euro	SenterNovem 2004, presentatie 19 april, nn.
techn. Levensduur opslag en transport CO2	35	jaar	gemiddeld tussen opslag (70 jaar) en capture technologieen.
invkosten CCS per Kwe (afvang)	260	euro	ECN, Seebregts 2006/Menkveld, 2004
inv kosten CCS transport en opslag/mtonco2	40000000	euro	
B&Okosten per ton CO2pj	1.3	euro	ECN, Seebregts 2006/Menkveld, 2004

**THEMA FINANCIEEL**

discountfactor	4.0%	
Rente	5.0%	

**THEMA CAPACITEIT**

zie onder thema gas en el	
economische groei	3%
jaargroei energieefficiency	2%





## **Bijlage 2. Het Zonneterp concept**



## Het Zonneterp concept

Door: Noor van Andel

Deze route omvat wat wel wordt aangeduid als De Kas als Energiebron en De Zonneterp ([www.Zonneterp.nl](http://www.Zonneterp.nl)). Deze technologieën, die hieronder worden toegelicht zijn een voorbeeld van wat mogelijk is; zij worden niet beschouwd als de enige mogelijkheden om voor de betrokken gebouwen bij een gedegen (volgens hedendaagse Senter/Novem normen) isolatie op 100% reductie te komen. Kern van de Kas als Energiebron is een combinatie van technologieën die gezamenlijk tot ruim 100% emissiereductie leiden bij de glastuinbouw. Dit systeemconcept maakt gebruik van een combinatie van technologieën: een nieuw type hoogefficiënte warmtewisselaar, verbeterde isolatie van de kas door gebruik van kanalenplaten en opslag van warm water (tot 25°C) in een diepe seizoensopslag in de bodem, 30...180 meter diep. Dit is mogelijk door een nieuw type warmtewisselaar, die met een zeer laag temperatuurverschil en met zeer weinig elektrische hulpenergie die warmte tussen kas en bodem kan uitwisselen. Er is over het jaar een netto overschot aan warmte equivalent aan 20 m<sup>3</sup> aardgas per m<sup>2</sup> kasgrond per jaar, dat na enige tijd, wanneer een reserve is opgebouwd, kan worden geëxporteerd, bijvoorbeeld voor nabij gelegen tuinbouw-bedrijven, woningen of bedrijfspanden. Er is berekend dat de extra investering in de warmtewisselaars zich in 3-7 jaar terug verdient, gerekend met een besparing van 60 m<sup>3</sup> per m<sup>2</sup> en een gasprijs van € 0,15 per m<sup>3</sup>. De vraag is of er door geforceerde ventilatie i.p.v. natuurlijke ventilatie er een productiestijging of verlies wordt gerealiseerd. Het is reëel te veronderstellen dat het systeem productieneutraal is. *[de tuinders nemen +15% aan]*

De “kas als energiebron” is meer dan een technologische trendbreuk. Implementatie van dit concept zal tot een heuse systeeminnovatie aanleiding geven:

- Op bedrijfsniveau: de kas zelf verandert doordat het aantal functionaliteiten toeneemt (energie niet als input maar als product of dienst),
- Op tuinbouwclusterniveau door het ontwikkelen van energie-uitwisseling tussen bedrijven,
- Op lokaal of regionaal niveau, door energie-uitwisseling met bedrijven, kantoren of woningen in een sectoroverschrijdend energy web.

De trendbreuk doet zich in eerste instantie voor op bedrijfsniveau en verbreedt zich naar andere systeemniveaus.

In de praktijk gaat een tuinbouwkas restwarmte leveren aan een woonwijk. In het geval van de Zonneterp worden er technologieën toegevoegd. Hierdoor kan een interactie tot stand worden gebracht tussen een tuinbouwkas en een woonwijk die op 30 km afstand hiervan ligt. Drie technologieën worden gecombineerd, de FIWIHEX, de HERON en een SOFC. deze passage is afkomstig van een notitie die is verspreid door v. Andel. Het plan is om deze drie technologieën –alle recentelijk geïmplementeerd- te combineren tot een wereldprimeur: een warmte-kracht-CO<sub>2</sub>-machine die op alle asvrije brandstoffen kan lopen, die nagenoeg de bovenste verbrandingswaarde kan realiseren, die een rendement op electriciteit heeft van 75%, en die zijn koolzuurgas zuiver en op druk aflevert.

### ***De Heron***

De Heron is uitgevonden in 1987-2005, [Rolf Hendriks, Hendrik Jan Ankersmit] gebouwd medio jaren 90. Het is een gasturbine met een 1,4 MW generator, die een uitzonderlijk hoog rendement heeft: 42%. De eerste Heron is gesteund door EZ en was bestemd voor warmte-krachtopwekking voor het RIVM in Bilthoven, maar dit project moest worden onderbroken wegens faillissement van de Schelde. Hij wordt in 2007 nogmaals getest door Efficient Energy Conversion Technology BV op de proefstand bij Thomassen Turbine Systems in De Steeg. De bedoeling is, hem op grote schaal te gaan inzetten in de Nederlandse Glastuinbouw.

### ***Fiwihex***

Fine Wire Heat exchangers, uitgevonden 1993-2005, hebben het mogelijk gemaakt door hun compacte bouw, hun laag drukverlies en hun lage prijs, om een glastuinbouwkas zo te installeren dat hij energie produceert in plaats van gebruikt. Twee proefkassen, Huissen en Berlikum, zijn gebouwd, in de komende jaren zullen tientallen hectaren op deze wijze worden uitgerust. Een vervolg op deze “Energieproducerende Tuinbouwkas” is het project “Zonneterp”, thans in voorbereiding in Nieuwveen, Hoogwoud, Lingewaard, Westland, waar een woonbuurt zijn nutsvoorziening ontvangt uit die kas.

Bekaert in België heeft in 2006 een dunne draad ontwikkeld, waarmee het mogelijk wordt de pijpen-recuperator van de Heron te vervangen door een FiwiHex, en daarmee het rendement van de Heron te laten stijgen tot 50%. Ook wordt de Heron hierdoor de helft kleiner, zodat hij ook als scheepsmotor kan worden ingezet. De FiwiHex is lager in kostprijs dan de conventionele warmtewisselaar. Ook de intercooler van de Heron kan worden vervangen door een FiwiHex, hetgeen nog eens 1 % rendement oplevert. Beide dunne-draad-warmtewisselaars kunnen door HSH geproduceerd worden.

### ***De HELP – SOFC***

De Holle-Elektrode-Losse-Plaat keramische brandstofcel is uitgevonden medio jaren 90 door Diederik Jaspers c.s., gebouwd en getest op 4 x 4 cm schaal met de bedoeling om een micro-warmtekracht-gasketel met 200 Watt-elektrisch [AGPO] te maken voor in woningen. HSH BV in Oldenzaal, huidig producent van de FiwiHex voor de glastuinbouw, heeft het plan deze SOFC te gaan produceren. De HELP-SOFC is veel eenvoudiger dan de thans bekende typen, veel lager in kosten, bevat geen afdichting, geen metaal, heeft geen probleem met schade door uitzettingsverschillen. De celafmeting die nu ontwikkeld is, hoeft niet groter te worden. Deze brandstofcel heeft het gebruikelijke 50% elektrisch rendement, maar geeft zijn warmte af bij 1000 °C. Daardoor is hij, in tegenstelling tot de typen die elders worden onderzocht, heet genoeg om direct de Heron aan te drijven: recent octrooi van Rolf Hendriks, november 2005. De turbine, die dan een “luchturbine” wordt, kan die warmte op zijn beurt weer met 50% in elektriciteit omzetten, waardoor een totaal rendement ontstaat van 75%. De SOFC is geen open vlam, waardoor de bij de verbranding ontstane CO<sub>2</sub> zuiver en op druk vrijkomt, en niet zoals gebruikelijk in een laag percentage in het afgas. De CO<sub>2</sub> kan dus worden geïnjecteerd in de ondergrond, of over lange afstand worden getransporteerd naar een tuinbouwkas. Het verbrandingswater wordt op hoge druk gecondenseerd, waardoor de bovenste verbrandingswaarde wordt benaderd. Er ontstaat geen NO<sub>x</sub> omdat er geen vlam is.

De Heron wordt een zero-emission-power-plant (zie onder route ZZZ) . Door zijn hoge toerental is er geen dreun zoals bij een gasmotor, hij kan in de stadswijk in een kelder worden geplaatst. Met de SOFC wordt de Heron niet groter in omvang, het elektrisch vermogen stijgt naar 4,2 MW, het thermisch vermogen blijft 1,5 MW, het brandstofverbruik 5,6 MW [LHV].

### **Toepassingen**

#### ***Schoon fossiel***

Kolen kunnen worden vergast buiten de stad, het kolengas getransporteerd naar deze WKK/CO<sub>2</sub> engines, die in de stadswijk staan, en zowel hun warmte als hun electriciteit ter plaatse leveren, zonder hoogspanningsnetwerken of duur warmtetransport. De CO<sub>2</sub> blijft gescheiden en kan worden gebruikt in de tuinbouw of worden “opgeborgen” onder de grond. Hiermee kunnen China en India hun kolenvoorraden op verantwoorde, duurzame wijze verstromen. Dit systeem is essentieel goedkoper en heeft een essentieel hoger rendement dan enig andere technologie.

#### ***Scheepsvoortstuwing***

Compacter, goedkoper en lichter dan een scheepsmotor, met haast het dubbele rendement, is deze combinatie het beste alternatief voor het “all-electric-ship”.

#### ***Glastuinbouw***

Ingezet in een tuinbouwkas-woonbuurt-combinatie [Zonneterp] kan de buurt op 30..50 km van de kas afliggen, en is de biomassaproductie van de kas, tezamen met het brandbare afval van de woningen, voldoende om alle nutsvoorziening op te wekken. Er is niet alleen geen fossiele brandstof meer nodig, maar zelfs geen import van biomassa meer. Het eigen afval is voldoende, na vergisting tot biogas.

## **Bijlage 3. Het concept De Stoere Houtman**



## Het concept De Stoere Houtman

Door: Jaap Huurman

### **De woelige wateren van De Stoere Houtman ofwel de ontdekkingsreis naar het gebruik van waterstof**

Ruim vierhonderd jaar geleden voerden de Amsterdamse kapiteins Cornelis de Houtman en Hendrick de Keijser uit met vijf schepen om voor 'ons' de zeeroute te verkennen naar het verre Indië, waarmee de Portugezen toen al enige tijd handel dreven. Na drie jaar kwam de Houtman met één schip terug, maar met voldoende rijkdom om de investering ruimschoots goed te maken.

Toen de bewoners van 138 maisonette-flat-appartementen, drive-in-woningen en bungalows in en rond De Houtmanstraat in de Arnhemse wijk Presikhaaf hoorde, dat de gemeente plannen had om hun woningen te slopen, werden zij heel boos en besloten de eigenarenvereniging De Stoere Houtman op te richten, want ze woonden heel fijn en wilden dat zo houden. Samen zetten de bewoners hun dromen op papier over het opknappen van hun woningen, over de nieuwbouw op de plek waar nu nog twee scholen staan, over een nieuw energiehuishouden en over al het andere dat met een goede buurt te maken heeft. Die dromen werden door het Ministerie van VROM beloond met een innovatie-subsidie van een half miljoen euro om daarmee plannen en ideeën uit te werken.

De Stoere Houtman heeft de mazzel deel te zijn van de Arnhemse samenleving, want ze hoefde niet ver te zoeken om aan Syncera Milieu-adviseurs en John Susebeek Consultants de opdracht te kunnen verstrekken voor een onderzoek naar een gelijk energiecomfort tegen minder kosten met gebruikmaking van de nieuwste technologieën als warmte-kracht-koppeling en/of met gebruikmaking van schone energiebronnen als zonlicht, wind en biomassa en/of met gebruikmaking van een energiedrager als waterstof.

De Stoere Houtman wil het niet laten bij een onderzoek, maar ze wil het ook van nabij kunnen ervaren wat waterstof is. Daarom is en blijft De Stoere Houtman met andere partners in het Arnhemse Waterstof Netwerk en daarbuiten bezig om in een buurtinformatiecentrum een waterstof-warmte-kracht-koppeling-installatie te krijgen. Daarom ook is De Stoere Houtman de grens overgegaan, opnieuw over woelige baren, naar o.a. Noorwegen en Japan om te zien, hoe waterstof dáár al werkt en om contacten te leggen met andere gebruikers. Door deze initiatieven en activiteiten heeft de EU De Stoere Houtman inmiddels namens de waterstofconsument als lid van de Finance and Business Development Group van het Waterstof Platform van de EU én heeft de United Nations World Environment Day van juni 2005 in San Francisco hem uitgenodigd een presentatie te komen geven.

De Stoere Houtman wil niet wachten op initiatieven van anderen voor het broodnodige schone Milieu, maar de ontdekkingsreis graag zelf ondernemen. Steun van anderen kan zij evenwel goed gebruiken, al is het maar om de scepsis in eigen gelederen om te kunnen buigen in gedeeld enthousiasme. De Stoere Houtman wil bovendien aantonen, dat vernieuwingen niet altijd van boven naar beneden komen, maar ook van onderen kunnen ontstaan. Om de nodige partners te vinden, wil De Stoere Houtman daarom zo snel mogelijk een tender uitschrijven.

Jaap Huurman,  
Voorzitter van De Stoere Houtman





## **Bijlage 4. Blending Hydrogen to Natural Gas<sup>1</sup>**



## Blending Hydrogen to Natural Gas<sup>1</sup>

### Introduction

There is currently much interest and investment in research and development of a hydrogen economy. However, quite some uncertainty remains about how hydrogen can be implemented in the existing energy system. To assist in this transition process, this paper contributing to the discussion and study of the feasibility of the Greening of Gas concept. The paper is focused on the Netherlands, but the insights gained are also relevant for the international community.

The introduction of a substantial volume of hydrogen in the current energy systems involves complexity in both technical and non-technical aspects. In advance we would like to emphasise that there are two ways to frame the case of mixing hydrogen into the natural gas.

1. Mixing hydrogen can be seen as an initial phase of a hydrogen economy
2. The natural gas/H<sub>2</sub> blend can be seen as an alternative energy carrier option in its own right.

In the first case the discussion is whether or not blending hydrogen into the natural gas network is a good first step towards a hydrogen economy. This discussion implies that the hydrogen economy in itself is the best option in the long run. Therefore we should only focus on the comparison between blending and developing a pure hydrogen pipeline system.

In the second case we can discuss the feasibility of the option relative to all other options including state-of-the-art natural gas (either with or without biogas-derived methane), 100% H<sub>2</sub> as the energy carrier or electricity in all electric society.

The focus in this paper is on the first case (mixing of hydrogen as an initial phase of a 'hydrogen economy') and we will discuss the advantages and disadvantages relative to alternative ways of introducing a hydrogen economy.

### Dutch natural gas, the grid, and hydrogen resources.

Natural gas is a major energy source in the Netherlands. It provides almost half of the amount of the annual energy requirement. Oil accounts for about one third, and coal about 10 %. Other energy sources such nuclear and renewable energy account for a relatively small part of the energy supplied. The main energy carriers in the Netherlands are electricity and natural gas for stationary applications and oil products for mobile use. Therefore natural gas has a special position in the Netherlands.

In the 1960's a large gas field was discovered in Groningen; a province in the North-Eastern part of the Netherlands ("Slochteren"). Later, many small gas fields were discovered on-land and offshore in the North Sea. The gas is transported over the country using an extensive gas grid.

In Figure 1, the Dutch natural gas grid is depicted. The network consists of a high-pressure backbone system of pipeline's mainly running from the largest gas field in Europe situated in the Province Groningen in the North-East of the Netherlands to the South and South-West.

Until now, the government has implemented a policy to exploit the small gas fields and keep the Slochteren field as a strategic reserve. The large Slochteren field contains about 14% nitrogen; so historically, this composition defined the technical criteria for most end-use appliances. The gases from the small fields have far less nitrogen and consequently have to be diluted with nitrogen to achieve the same "Wobbe index" as the Slochteren gas within certain limits<sup>2</sup>. This is done in several mixing stations along the grid.

<sup>1</sup> Verkorte versie van De Wit (Linde Gas Benelux), Hemmes (TUD), Leslie Zachariah (TUD) and Barten (HyServe), 'Opportunities and Potential limitations of blending Hydrogen to natural gas. The Greening of Natural Gas in The Netherlands', (forthcoming, submitted to WHTC 2007 (world hydrogen technologies convention; Montecatini Terme; Italy; November 2007)).

<sup>2</sup> Wobbe index and energy content: Basically the value of the index is a measure for the amount of energy flowing through a burner. It is mathematically described as the higher heating value of the gas divided, by the square root of the relative density. Effectively, the units of the Wobbe Index are the same as for the heating value: energy per mole or energy per volume MJ/m<sup>3</sup>.



We will distinguish between the introduction of hydrogen into the high-pressure H-gas industrial network, and introduction into the distribution network for the lower calorific G-gas.

**b. Case 1: Mixing 15 vol% of hydrogen into the distribution network for small consumers.**

Introduction of hydrogen into the high-pressure industrial network in the Netherlands introduces additional problems, relative to the mixing of hydrogen into the distribution network for small consumers. Such as

- adoption of large-scale industrial processes and equipment to the new gas mixture,
- possibly more severe material problems (hydrogen embrittlement) in the high-pressure pipelines.

Moreover, industry is not only using natural gas as an energy source, but also as a feedstock providing C and H atoms. Large fluctuations in gas pressure causing large fluctuations in mechanical load of the pipeline material might introduce enhanced failures due to hydrogen embrittlement. The low-pressure distribution network is less susceptible to these problems. Therefore it makes sense to study the option of the introduction of hydrogen only to this distribution network. A study by Gastec indicated that up to 17% of hydrogen could be mixed in the Dutch natural gas without disturbing the proper functioning of a certain type of gas stove for households. Assuming that such a percentage can indeed be realized without causing malfunctioning of any appliances connected to the distribution network and no material problems occur, we will show next that this still is a very modest scenario for the introduction of hydrogen.

The mixing of 15 vol% of hydrogen corresponds to only 5.6% in terms of energy. Furthermore, the distribution network carries only about 50% of all the natural gas consumed in the Netherlands, so only 2.8% of that energy is now distributed in the form of hydrogen. Since natural gas is the source of about 50% of the total energy that is consumed in the Netherlands, the amount of hydrogen in this scenario contains only 1.4% of the total energy consumed in the Netherlands. Yet on the other hand this scenario is still ambitious in terms of the amounts of hydrogen that are needed. The amount of natural gas transported through the distribution net is about  $20 \cdot 10^9 \text{ Nm}^3$

per year. The volume of the mixture carrying the same amount of energy equals  $22 \cdot 10^9 \text{ Nm}^3$ . So 15% of this volume is the amount of hydrogen needed per year:  $3.3 \cdot 10^9 \text{ Nm}^3$ . Steam methane reformer (SMR) plants are built to supply hydrogen to oil refineries. The largest production facility in the world has a production capacity of approximately  $1.25 \cdot 10^5$  cubic meter per hour, which is equivalent to  $1.1 \cdot 10^9 \text{ Nm}^3$  per year. So producing this amount of hydrogen from natural gas by this standard industrial technology would require *three* of the largest existing hydrogen production facilities in the world. Present natural gas combustion levels of 40 billion  $\text{Nm}^3$  per year is responsible for 80 Mton of carbon dioxide emissions. Applying CCS at these facilities will reduce carbon dioxide emissions due to the use of natural gas by 2.8% which corresponds to 1.74 Mton of carbon dioxide per year, indeed a very modest scenario.

**c. Case 2, the “Hythane case”: Mixing 25 vol% of hydrogen into both the industrial and distribution network.**

A more ambitious scenario in which Hythane will become the European standard for gas quality might find its driving force in the use of Hythane has a high-quality gas with low emissions in the transport sector. Natural gas vehicles are already widely used in some countries and are assumed to be easily modified to use Hythane. On the other hand all industrial and households appliances will have to be adapted to the new standard. The mixing of 25 volume% of hydrogen equals 10% in terms of energy. So of the  $40 \cdot 10^9 \text{ Nm}^3$  of natural gas 10% i.e.  $4 \cdot 10^9 \text{ Nm}^3$  will be replaced by approximately  $12 \cdot 10^9 \text{ Nm}^3$  hydrogen per year, yielding a total Hythane volume of  $48 \cdot 10^9 \text{ Nm}^3$ /year. This would require 11 of the largest existing hydrogen production facilities in the world.

In addition an extra amount of Hythane is needed for the transport sector, if the transport sector switches from oil to Hythane. Assuming that presently one third of the energy consumption in the Netherlands can be attributed to the transport sector and one third is supplied in the form of natural gas the required amount of Hythane would approximately double from  $48 \cdot 10^9 \text{ Nm}^3$ /year to  $96 \cdot 10^9 \text{ Nm}^3$ /year.

Replacing  $4 \cdot 10^9 \text{ Nm}^3$  of natural gas by  $12 \cdot 10^9 \text{ Nm}^3$  hydrogen will thus reduce  $\text{CO}_2$  emissions by  $4 \cdot 10^9 \text{ Nm}^3$  or  $8 \cdot 10^9 \text{ kg}$  per year = 8 Mton/year. Here we of course assumed that the hydrogen will be produced free of  $\text{CO}_2$  emissions. On top of that Hythane emits less carbon dioxide emissions per-unit energy than

gasoline or diesel. So when Hythane is also used in the transport sector an additional reduction in carbon dioxide emissions will be achieved. The replacement of all natural gas by CO<sub>2</sub> free hydrogen with the same energy content yields a carbon dioxide emission reduction of 80 Mton/year. At a price of 0.10 €/Nm<sup>3</sup> and the assumed doubling of the price of hydrogen, the price of the natural gas was  $40 \cdot 10^9 \text{ Nm}^3 \cdot 0.10 \text{ €/Nm}^3$  i.e.  $4 \cdot 10^9 \text{ €}$  and will thus double when it is fully replaced by hydrogen. A reduction of 80 Mton/year carbon dioxide thus costs  $4 \cdot 10^9 \text{ €}$  or 20€/ton CO<sub>2</sub>. We note again that this holds under the assumption that the hydrogen price is twice that of natural gas per unit energy and natural gas costs 0.10 €/Nm<sup>3</sup>. However, the costs per ton CO<sub>2</sub> emissions avoided are in the same order of magnitude as average market prices for CO<sub>2</sub> emission rights in 2006.<sup>3</sup> Yet it should be noted that current prices have dropped drastically to historic low values of only 1 €/ton CO<sub>2</sub>.

**d. Seasonal and daily fluctuations.**

Another problem that has been raised, is the large seasonal difference in gas consumption as well as the large fluctuations over a day of 24 hours. However these fluctuations can in principle be dealt with by a combination of flexible production units and a small additional buffer facility (Schouten e.a., 2006).

**e. Fossil versus renewable**

Although the amount of sunlight on earth is about 10000 times larger than the world energy consumption and thus in principle renewable energy is abundantly available, in practise it is not. For the Netherlands sources are mainly limited to wind, biomass and solar PV. Wind and solar PV produce electricity and should not be used to produce hydrogen, because the use as electricity leads to an immediate and large reduction of fossil energy use. This is and will be the case since electricity is and will be produced from fossil energy mainly in the coming decades. At an efficiency of 40% of a fossil power plant the delivery of one unit of electricity leads to a reduction of 2.5 units of fossil energy. Nevertheless just for the sake of the argument if we want to use wind energy for the production of hydrogen, even in the ambitious plan of a 6 GW offshore wind park covering a major part of the Dutch territory of the North sea, the amount of wind energy available would be just enough to replace only 5% of the present yearly natural gas consumption or

about 2.5% of the total energy consumption in the Netherlands (assuming no conversion losses in the electrolyzers). A 6 GW (peak) wind park can deliver on average approximately 2 GW, while 5% of the yearly gas consumption equals  $2 \cdot 10^9 \text{ Nm}^3/\text{y}$ . With an energy density of 9 kWh/Nm<sup>3</sup> (see table 1) and 8760 hours in a year this indeed corresponds to (a little more than) 2 GW. But again this calculation is only intended to show that the amount of wind energy that could ultimately be available is still orders of magnitude lower than needed to replace our fossil energy sources, and the calculation is certainly not intended to argue in favour of the conversion of wind energy into hydrogen. Biomass is a much more feasible source of hydrogen (or biogas) to be mixed into the natural gas grid. Estimates on the available amount differ strongly depending on assumptions, but they certainly are very limited compared to the total natural gas consumption. For any significant amount of biomass supply the Netherlands would have to rely on imports (e.g. through Rotterdam Main port)

**Arguments pro and con a transition from natural gas to natural gas/Hydrogen mixtures.**

**f. Arguments in favour of the Greening of Gas**

**i. Reducing diffuse carbon dioxide emissions**

Due to the lower carbon content in the gas mixture, the carbon dioxide emissions after the combustion in the end-user appliances are reduced. Whether or not overall emissions are reduced depends on the way the hydrogen is produced. Given the large quantities of hydrogen that are needed, the use of fossil energy to produce the required amounts of hydrogen in the coming decades seems inevitable. In that case, carbon dioxide emissions can only be reduced by CCS (carbon capture and storage) at the central production facilities or used otherwise. Introducing 25% per volume of hydrogen into natural gas relates to approximately 10% of the energy. In section 5.3 it was calculated that given the yearly gas consumption of the Netherlands an -end of pipe- emission reduction can than be realised of 8 Mton/year on a total of more than 200 Mton/year for the whole of the Netherlands. In the latest stages of a transition to a hydrogen economy, hydrogen can be produced more and more from renewable energy sources of which biomass would be the most

<sup>3</sup> <http://Www.Emissierechten.Nl/Marktanalyse.Htm>

feasible in the Netherlands, since this avoids the conversion step from electricity into hydrogen.

## **ii. Avoiding the cost of a dedicated hydrogen pipeline infrastructure**

Apart from reducing diffuse CO<sub>2</sub> emissions, the transport of hydrogen through the existing natural gas network avoids the cost associated with the building of a whole new hydrogen pipeline infrastructure. As a rule of thumb a cost of €500 per meter pipeline infrastructure can be assumed.

## **iii. No pure hydrogen required**

Producing H<sub>2</sub>/natural gas mixtures or methane/hydrogen mixtures would be more suitable and offers advantages in terms of lower cost and higher production output in some cases. For example in the reforming of natural gas to produce hydrogen the conversion does not have to be optimised to produce 100% hydrogen since the hydrogen is to be mixed with natural gas anyway. So constraints on the production method are relaxed, allowing for lower conversion rates, cheaper catalysts and omission of a purification step.

## **iv. Reducing inefficiencies in the present natural gas grid**

A driving force for the transition from natural gas to H<sub>2</sub>/natural gas mixtures can be found in the inefficiency of the present Dutch system, in which the standard gas quality is 'Slochteren' gas; a low quality gas containing relatively large amounts of N<sub>2</sub>. In order to use gas from other (high quality) gas fields the gas must be diluted with N<sub>2</sub> and special air separation/compression and mixing stations are built for this purpose. From an energy (exergy) perspective as well as from an economic point of view this is very inefficient. However, it is necessary in order to operate end-use equipment safely and without problems. Mixing hydrogen instead of nitrogen with high quality natural gas results in a gas mixture that also fulfils the specifications for 'Slochteren' gas. Hence the present inefficiency can be circumvented.

## **v. The quantitative argument or 'fossil energy is here to stay'**

As has been shown in chapter 5; '*quantitative analysis*' the amounts of hydrogen needed are huge and beyond the imagination of many people. Replacing just

10% of the natural gas by hydrogen, requires about 11 of the world's largest commercial SMR (steam methane reformer) installations in the world. Even this relatively modest penetration of hydrogen requires a huge investment; obviously the cost for the 100% hydrogen option would be much greater. All studies on the world energy supply came to the conclusion that it is inevitable that we will still rely significantly on fossil energy in the next decades. Therefore, it makes sense to not fully replace natural gas by hydrogen but instead adopting a more realistic view and accept a large component of fossil fuel, not only in the total mix, but also in a particular fuel blend.

## **vi. Hythane**

An additional argument relates to the view on the mixing concept as mentioned in the introduction, namely, that of 'just' an alternative fuel. Hythane is a common name for a mixture of about 20% hydrogen into natural gas that can be readily used in automotive applications in cars and trucks that are built for natural gas.

Larsen et al. showed that combustion engines using Hythane instead of natural gas yield lower emissions, while it is known that natural gas combustion engines have already a much lower emission profile than gasoline combustion engines. (Larsen and Wallace, 1997). A transition to Hythane as the new standard would increase the security of supply because natural gas is more widely available than oil. Additionally the hydrogen can be produced from a number of sources of which coal is the most abundant and providing the highest level of security of supply.

## **vii. Increasing access to the natural gas grid for biogas and coal gas.**

Due to the strict regulation and narrow bandwidth for the Wobbe index and caloric value of the gas that is allowed in to the natural gas grid, the supply of biogas to the grid is problematic. Either synthetic natural gas has to be produced from the biogas first, or the biogas has to be used otherwise. The conversion into electricity is often proposed, but the issues of gas cleaning and the relatively small scale of electricity production have a negative impact on efficiency and economics. Adopting a new standard that also includes hydrogen in the gas mixture allows for the introduction of biogas without expensive preprocessing and conversion steps. In this way, the development of biomass and biomass gasification will be promoted. Moreover a revival of city



gas produced for example by steam reforming or gasification of coal is to be considered as a strong driving force for allowing hydrogen containing gas mixtures to be fed into the natural gas grid. Coal is abundantly available for long periods of time, and found in several places on Earth, reducing security of supply problems related to oil and natural gas supply. Obviously a modern version of city gas production should include carbon capture storage.

#### viii. Dynamic storage

Another interesting possibility could be envisioned when we allow for a fluctuation of hydrogen content (relative to a fixed nominal  $H_2$  percentage, say 10% by volume) in the blend. For the Netherlands, at the current rate of natural gas consumption of  $40 \cdot 10^9 \text{ Nm}^3/\text{y}$  (or  $1.3 \cdot 10^3 \text{ Nm}^3/\text{s}$ ), allowing for a fluctuation of  $\pm 1\%$   $H_2$  implies that on average,  $130 \text{ Nm}^3/\text{s}$  of hydrogen can be put into or extracted from the grid. In other words at any point in the grid it is allowed to input or extract hydrogen at a rate of 1% of the local flow. At a constant rate and for the whole of the Netherlands this would be equivalent to  $0.4 \cdot 10^9 \text{ Nm}^3/\text{y}$ . It presents storage possibilities for hydrogen that are not easily achieved otherwise. However, since the hydrogen is not stored in the pure form, the drawback of this method is linked to the costs and difficulties in the extraction of hydrogen from the mixture and, in some cases, to the costs of increasing its pressure from the partial pressure of the mixture to consumer pressure. That is if we introduce a surplus amount of hydrogen at atmospheric pressure into the grid than the partial pressure of this hydrogen is reduced to around 0.1 atm., which represents a loss. To get it out via a hydrogen membrane for example we would have to reduce the pressure at the outward side of the membrane by means of a vacuum pump for example and pump up the pressure to atmospheric pressure or higher for use in our application, which requires energy. Alternatively we can choose to store hydrogen in the high pressure net. If this pressure is higher than 10 bar than the stored hydrogen is at a partial pressure of 1 bar or higher and can be filtered out by a membrane to applications without the use of a pump. In this case however we have to bring the hydrogen to a pressure of 10 bar or higher to be able to introduce it into the pressurised grid. The higher the nominal hydrogen concentration in the natural gas the lower is the energy loss in the storage and 'taking out' process. The technical merits of this unconventional storage option have to be investigated further in order to determine its feasibility in practice.

#### ix. Cheap and easy transport of hydrogen

Two of the main problems associated with hydrogen as a main energy carrier, namely transport and storage, are addressed in the mixing concept. As indicated above in the section 'dynamic storage' both transport and storage are possible but within limitations and with restrictions. Hydrogen transports can only take place in the flow direction of the natural gas. Extracting hydrogen from the mixture involves separation equipment, with additional costs and energy losses. Introducing hydrogen solely for the purpose of extracting it downstream is nonsensical, because of the cost and energy loss is involved. However, introducing hydrogen in an already mature Hythane network is a different issue. In this case, it resembles the dynamic storage concept described above and the energy losses involved are much less because the concept is applied around a nominal hydrogen level in the mixture instead of starting from zero.

#### *g. Hurdles on the way to Greening of Gas (arguments con)*

##### i. Leakage and Hydrogen Embrittlement

A frequently used argument against mixing is that hydrogen is supposed to leak faster through pipeline materials by a higher diffusion speed and that it has a higher leakage rate at weak spots such as pipeline connections due to its small molecular diameter. Hydrogen embrittlement is a phenomenon that occurs in certain materials, under certain circumstances. Some materials are more susceptible to hydrogen embrittlement than others. The fact that the existing natural gas pipeline infrastructure contains many more than just one construction material increases the chances of a failure. The material used for pipelines has changed over time, while the oldest pipeline's date back to as much as about a century ago. Hydrogen embrittlement is more likely to be a serious problem in high-pressure pipelines with large fluctuations in pressure and thus large fluctuation in mechanical stress. So the transport pipeline system would be more susceptible to hydrogen embrittlement than the distribution network. Therefore, we have separated the two cases in our quantitative analysis in section 5. It is however emphasized here that these all are perceived problems and no research is known to the authors that quantify the problems and convincingly show that these potential showstoppers are indeed showstoppers.

## ii. Gas Quality requirements

Hydrogen has a calorific value of about one third of natural gas, of which methane is the main component. When hydrogen is blended with natural gas, the Wobbe value will change. On the other hand, also the density is much lower. Both effects combined yield the Wobbe indexes for G-gas and H-gas as a function of hydrogen percentage as depicted in **Figure 2**.

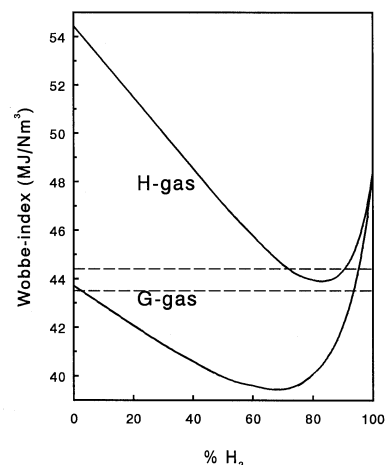


Figure 2 Wobbe Index as a function of percentage of hydrogen mixed into natural gas for G-gas and H-gas respectively. [Janssen 2003]

From Figure 2 one might easily conclude that when hydrogen is blended into G-gas, the percentage of hydrogen is limited to only a few percent. This is different with H-gas, at which a higher percentage of hydrogen is allowed. One should take into consideration that Dutch gases are mixed routinely in order to achieve the desired quality. Mixing of hydrogen in G-gas and simultaneously mixing H-gas, makes it possible to increase the hydrogen content of the mixture above a few percent, while still staying within the allowed Wobbe index and caloric value bandwidths.

## iii. Production of Hydrogen and Flexibility of Demand

The Wobbe index also plays an important role in the production of hydrogen for the Greening of Gas. Natural gas is not consumed according to a flat flow pattern, but is strongly influenced by day and night and seasonal variations, which mainly depend on outside temperature. This is especially the case for G-gas as it is mostly used for space heating. The difference between summer and winter can be a factor 8. When the hydrogen content in natural gas should be constant in order to maintain a constant Wobbe value, then this would have big consequences for the production flexibility of hydrogen. When the demand decreases instantly, the production will be altered according to the so-called *turn-down rate*. In practice, this means that it could take hours to decrease a hydrogen plant's production from full load to, say, 70% load. From an investment point of view it is not always intelligent to design and construct a production installation on a steep LDC. The only hydrogen production technology that is able to provide the required flexibility, is electrolysis. The drawback is that this technology is not characterised by the feature of *economies of scale*, as is with the case for most chemical process installations.

From the perspective of the actual hydrogen content related to the Wobbe value and related to the required flexibility in demand, the question rises whether to invent all kinds of new (system) technological concepts, or start a discussion on the allowable Wobbe range. Extending the Wobbe range would allow that occasionally more hydrogen may be blended and less when less hydrogen is available. The possibilities to extent the Wobbe range depend on technical limitations in end-user applications. The question whether a constant hydrogen percentage is really necessary should be investigated. When a variation of a certain percentage is allowed then the demand for more flexibility is not solved by flexibility in the production of hydrogen but by changing the institutional context.

## iv. Increased volume of the mixture limiting transport capacity

Gas flows will increase when hydrogen is blended into natural gas at given constant energy consumption. It is shown that up to a hydrogen volume percentage of 50% the volume increase of the gas mixture is less than that blending percentage. At 25 volume percent of hydrogen, the total volume has increased to about 120%. So for most practical cases this increase in volume is

limited. Moreover, because of the different viscosity of hydrogen the flow resistance in the pipelines decreases, thus partly compensating the increased flow. Also one should note that the natural gas grid is capable of dealing with peak demand in wintertime, so it is capable of handling much large volumes of gas than average consumption. Only to supply the highest peaks in wintertime it might be necessary to have some additional storage capacity locally available (on top of existing storage capacity) either for the mixture or for just for the hydrogen to lower the transport peak capacity needed.

#### v. International Context

Where should hydrogen be added to the natural gas? The most logical answer would be at the existing blending stations in the Dutch locations Wieringermeer, or Ommen [Zachariah 2004]. The consequence would be that hydrogen will be blended into the transmission network. This same network is connected to Germany, Belgium and the UK (see *Figure 1*). So blending in hydrogen at these blending stations makes Greening of Gas going abroad. Discussions regarding pipeline material and Wobbe values should therefore be placed in an international context. It is also possible to blend into Regional Transport Networks (RTNs). The consequence would be that the international transmission network would be left aside with regard to the hydrogen mixing. The physical mixing would then take place after the gas reception stations ( $\pm 1,100$  in number in the Netherlands). In that case, the question is where to produce the hydrogen; decentralised near by the reception stations or centralised including a hydrogen transmission system for supplying reception stations with hydrogen. The latter option does not make much sense, while we are comparing the mixing option with a dedicated hydrogen network. If the mixing option would need a dedicated hydrogen network it could only make some sense if this dedicated transport network is much more than a full hydrogen network.

#### vi. Increased fossil energy consumption due to conversion losses

Due to conversion losses in the conversion from fossil energy to hydrogen a net overall efficiency loss is obtained for the whole conversion chain if the end-use efficiency is not improved. This argument holds for a hydrogen economy in general and not exclusively for the mixing case. So the difference in total energy consumption between the two options is determined by the

difference in hydrogen production efficiency and the differences in end-use efficiencies. Since presently more than 95% of the natural gas is used for combustion and the production of heat, there is no efficiency improvement if there are no changes in end-use. Application of fuel cells, for example in combined heat and power operation does have the potential to increase overall efficiency in the conversion chain, but with high temperature fuel cells this can also be realized in the present natural gas network. In principle, the low-temperature polymer fuel cell could operate on the Hythane mixture without the need for an external reformer, which would significantly lower the cost and would make micro-CHP fuel cell systems cost-effective in the near future. A polymer fuel cell could extract the hydrogen from the mixture. However, the development of the complete combined heat and power system is not trivial, because it still should provide a solution for the use of the hydrogen depleted mixture that exits the polymer fuel cell. As long as no meaningful system concept is developed for that problem the hydrogen natural gas mixture does not provide an overall efficiency benefit relative to a dedicated hydrogen network.

#### vii. The 'Grand Cru' argument

The mixing of pure hydrogen into the natural gas network is sometimes compared with the mixing of a high-quality wine like a 'Grand Cru' with a table wine. As reflected in the price, hydrogen is considered to be an energy carrier of higher-quality than natural gas, which could (still) be labelled as a commodity. In the mixing hydrogen loses its quality. This argument could certainly be defended for the high-quality hydrogen obtained by electrolysis. Electricity is generally regarded as the energy form of the highest-quality, because it can be converted with low losses into almost any other form of energy and moreover it is the only form of energy that is capable of driving our electronics in ICT, Telecom etc.

Direct conversion of fossil energy to hydrogen would be a much more sensible option. About two units of hydrogen, would be obtained from every 2.5 units of fossil energy, instead of about 0.8. It is argued above that the hydrogen produced in the conversion from fossil energy or biomass does not have to be purified to the very high quality as delivered by electrolysis. So never hydrogen of 'Grand Cru' quality will be produced with the purpose to mix it into the natural gas grid. Therefore the 'Grand Cru' argument, though principally correct, has little to do with the actual situation when natural gas will be replaced by a gas mixture containing hydrogen.

## Conclusions

In this paper arguments pro and con the mixing of hydrogen into the natural gas network are analyzed and put into the context of the argumentation on a hydrogen economy and on a higher level the drivers for change of our energy system in general. It is important to structure the arguments and counterarguments in a systematic way, as we attempted in this paper, otherwise the discussion is impaired by arguments on different levels, addressing different issues on a different timescale. The quantitative aspect is another important issue addressed in this paper and often ignored. It relates to the huge amounts of (fossil) energy presently used, the enormous task to gradually replace that supply by renewable energy and the hard physical limitations on the available renewable energy sources (in the Netherlands). Moreover renewable energy forms that produce electricity (wind, PV) should not be used to produce hydrogen. Direct use as electricity will save more fossil energy because of the large contribution of fossil energy in the electricity energy mix; now and in the coming decades. Even so, in the most ambitious plans for a 6 GW off-shore wind farm covering most of the Dutch North sea area; the supplied wind energy would be just enough to replace 10% of the natural gas by hydrogen. The Greening of gas concept does provide a scenario for the rapid introduction of hydrogen on a large scale. However on the short to medium term this hydrogen will most likely have to be produced from fossil energy mainly. When using carbon capture and storage during production of the hydrogen to replace 10% of the natural gas CO<sub>2</sub> emissions are reduced by 8 Mton/year (compared to a total of more than 200 Mton/y for the Netherlands). The alternative scenario with a comparable impact would be to connect 10% of the consumers to a dedicated hydrogen network. The cost of

such an alternative would be much higher because on top of the production costs for hydrogen (which are higher for producing pure hydrogen) the cost for a dedicated hydrogen infrastructure (~0.5 Meuro/km) have to be added, unless the present pipeline system can be used directly for pure hydrogen, or easily adapted for the use of pure hydrogen. Sooner or later a shortage of natural gas (either physical, economical or geopolitical) will promote the use of coal and a revival of 'town gas' derived from coal. The present development of coal and biomass gasifiers already yields a driving force to open up the natural gas grid for other gasses than just natural gas including hydrogen containing gases.

## References

- Correljé, A, G Verbong, 2004, The Transition to Gas in the Netherlands. in KG F.G. Boelie Elzen (ed), Break on through to the other side: Technological transitions to sustainability through system innovation. Cheltenham UK, Edward Elgar.
- Larsen, JF, J S Wallace, 1997, Comparison of emissions and efficiency of a turbocharged lean-burn natural gas and hythane-fueled engine: Journal of Engineering for Gas Turbines and Power-Transactions of the Asme, v. 119, p. 218-226.
- Schouten, JA, R Janssen-Van Rosmalen, J P J Michels, 2006, Modeling hydrogen production for injection into the natural gas grid: Balance between production, demand and storage: International Journal of Hydrogen Energy, v. 31, p. 1698-1706.



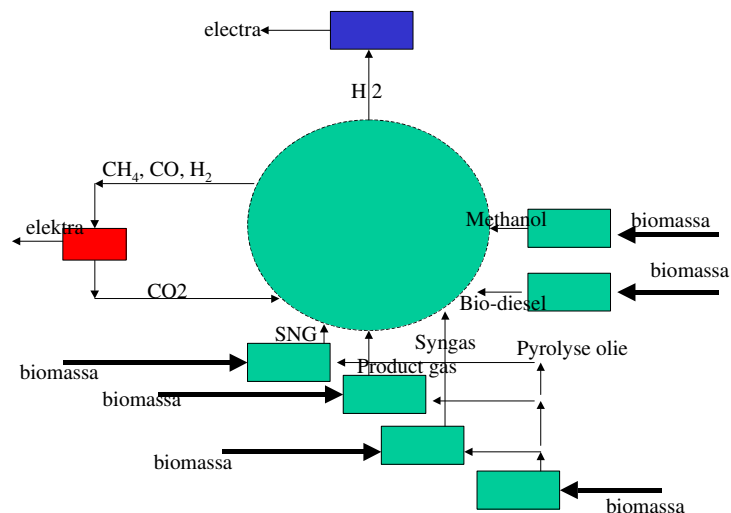
## **Bijlage 5. Het concept Gass River**



## Het concept Gass River

Door: Boudewijn Klaversteijn

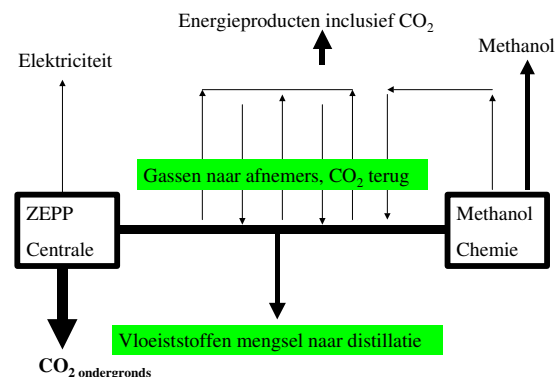
### Gass River, de weg naar een CO<sub>2</sub> neutraal industriegebied?



Er leeft een idee het Eemshaven gebied CO<sub>2</sub> neutraal te maken door er een next generation infrastructure leiding te leggen waarin methaan, waterstof, ongezuiverde biogas, SNG, koolmonoxide, kooldioxide, methanol en ethanol in rondgaan. Aan het ene eind van de “Gass River” leiding neemt Methanol Chemie Nederland de gassen die het nodig heeft voor haar methanol synthese door het te filteren en stopt het de CO<sub>2</sub> die tijdens de methanol synthese vrijkomt terug in de leiding. Aan de andere kant staat de ZEPP centrale in Drachten die al het gas wat haar kant opkomt, ongeacht de hoeveelheid CO<sub>2</sub> die het bevat, verbrand. De rookgassen van deze centrale die voor bijna 100% uit CO<sub>2</sub> bestaan worden vervolgens gebruikt om de gasproductie in het

Akkrum veld te verbeteren. De CO<sub>2</sub> blijft achter in het gasveld. Alle bedrijven die langs de Gass River staan beschikken over filters waarmee ze precies dat gas of die gassen of vloeistoffen die zij nodig hebben uit de Gass River kunnen vissen. De CO<sub>2</sub> die deze bedrijven langs de Gass River produceren kunnen (moeten) ze weer terugstoppen in de Gass River leiding. Op die manier kan elk bedrijf dat zijn CO<sub>2</sub> afgeeft klimaat neutraal genoemd worden.

Langs de Gass River staan ook bedrijven, vaak innovatieve bedrijven, die producten zoals synthese gas, waterstof, SNG, boeren methanol, enz maken. Zij voeren de producten die zij produceren samen met de CO<sub>2</sub> die ze vaak ook produceren de Gass River in.



### All in one connector

